



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU
TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS**

**“Studi Kasus untuk $d/D = 1,0$; Jarak $S/D = 2,0$; Reynolds Number
(Re) = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”**

**AYU PUTRI PRATIWI
NRP 021114 40000 009**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU
TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS**

**“Studi Kasus untuk $d/D = 1,0$; Jarak $S/D = 2,0$; Reynolds
Number (Re) = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$;
 $0,25$; $0,5$ ”**

AYU PUTRI PRATIWI

NRP 021114 40000 009

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

PROGRAM SARJANA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF
DISTURBANCE CYLINDER AGAINST TO THE PERFORMANCE
OF SAVONIUS WIND TURBINE**

**“Case Study for Comparison $d/D = 1,0$; Interval $S/D = 2,0$;
Reynolds Number (Re) = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; with y/D
= $0,0$; $0,25$; $0,5$ ”**

**AYU PUTRI PRATIWI
NRP 02111440000009**

**Advisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**UNDERGRADUATE
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SURABAYA
SURABAYA 2018**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER
PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE SAVONIUS**

"Studi Kasus $d/D = 1,0$; Jarak $S/D = 2,0$; Reynolds Number
(Re) = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$;
 $0,5$ "

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AYU PUTRI PRATIWI

NRP. 0211 14 40000 009

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T (Penguji II)
NIP. 197104051997021001
4. Vivien Suphandani, ST., M.E., Ph.D. (Penguji III)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

JULI, 2018

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER
PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE SAVONIUS**

“Studi Kasus $d/D = 1,0$; Jarak $S/D = 2,0$; Reynolds Number (Re)
 $= 9,7 \times 10^4; 14,5 \times 10^4; 17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ ”

Nama Mahasiswa : Ayu Putri Pratiwi
NRP : 02111440000009
Departemen : Teknik Mesin FTI- ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Pada tahun 1995-2015 cadangan minyak bumi semakin berkurang dari 5,9 miliar barel menjadi 3.7 miliar barel. Konsumsi energi fosil yang tinggi dan tidak ada penemuan cadangan minyak bumi baru akan menyebabkan krisis cadangan minyak bumi dan batu bara. Sehingga dibutuhkan solusi energi alternatif untuk menekan angka penggunaan energi fosil. Salah satu energi alternatif yang cocok untuk Indonesia adalah energi angin. Energi angin dapat dikoversikan menjadi energi listrik dengan turbin angin dan generator, sehingga tidak ada polusi udara. Salah satu contoh turbin angin yang dapat digunakan pada kecepatan angin rendah adalah turbin angin Savonius. Turbin Savonius memiliki dua buah sudu yang disebut advancing blade dan returning blade. Saat angin bertiup akan memberikan gaya drag yang berbeda pada advancing blade dan returning blade. Perbedaan gaya drag akan menghasilkan torsi dan dapat dikonversikan menjadi daya. Disisi lain, turbin angin Savonius memiliki efisiensi paling rendah diantara turbin angin lainnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan silinder sirkular di depan returning blade.

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen pada kondisi udara terbuka dengan angin dari sebuah axial fan yang diseragamkan dengan honeycomb. Turbin angin Savonius

memiliki diameter (D) = 165,2 mm; tinggi (H) = 294,4 mm dan sebuah silinder sirkular dengan diameter 165,2 mm dan tinggi 500 mm. Variasi dilakukan pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ dan posisi silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (y/D) sebesar 0; 0,25; 0,5 yang dihitung berdasarkan kecepatan freestream (U) dan panjang karakteristik turbin $L=2D-b-2t$ (b adalah diameter shaft). Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer, putaran turbin diukur dengan tachometer, torsi statis turbin diukur dengan torque meter, torsi dinamis turbin diukur dengan brake dynamometer dan daya turbin diperoleh dari hasil perkalian antara torsi dinamis turbin dengan putaran turbin.

Pada studi eksperimen ini menunjukkan hasil bahwa penambahan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 1$ dan $S/D = 2,0$ efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang ditandai dengan kenaikan nilai putaran (n), Coefficient of Power (CoP), Coefficient of Moment (Cm), dan torsi statis (T_s) angin Savonius yang dibandingkan dengan turbin angin Savonius tidak diberi silinder pengganggu. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan putaran terbesar diperoleh pada $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ sebesar 1,03 kali. Nilai coefficient of power terbesar diperoleh pada $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number $17,8 \times 10^4$ sebesar 1,17 kali. Nilai coefficient of moment terbesar diperoleh pada $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number $14,5 \times 10^4$ sebesar 1,13 kali. Nilai torsi statis minimum terbesar diperoleh pada $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number $17,8 \times 10^4$ sebesar 0,84 kali

Kata kunci : Turbin angin Savonius, silinder pengganggu, coefficient of power, coefficient of moment, torsi statis, putaran, reynolds number, perbandingan jarak S/D , perbandingan jarak y/D

EXPERIMENT STUDIES ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER AGAINST TO THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Case Study for Comparison $d/D = 1.0$; Interval $S/D = 2.0$;
Reynolds Number (Re) = 9.7×10^4 ; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 ; with $y/D =$
 0.0 ; 0.25 ; 0.5 ”

Student Name : Ayu Putri Pratiwi
NRP : 02111440000009
Department : Mechanical Engineering FTI- ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

In 1995-2015 petroleum reserves decreased from 5.9 billion barrels to 3.7 billion barrels. High fossil energy consumption and no new petroleum reserves will cause a crisis of petroleum and coal reserves. So it takes alternative energy solutions to suppress the use of fossil energy. One of the alternative energy suitable for Indonesia is wind energy. Wind energy can be converted into electrical energy with wind turbines and generators, so there is no air pollution. One example of wind turbines that can be used at low wind speeds is the Savonius wind turbine. The Savonius turbine has two blades called advancing blade and returning blade. When the wind blows will give different drag force on advancing blade and returning blade. The drag force difference will produce torque and can be converted to power. On the other hand, Savonius wind turbine has the lowest efficiency among other wind turbines. The purpose of this study was to improve the performance of the Savonius wind turbine by placing the circular cylinder in front of the returning blade.

This research was conducted by experimental method on open air condition with wind from a uniformed fan axial with honeycomb. Savonius wind turbine has a diameter (D) = 165.2 mm; high (H) = 294.4 mm and a circular cylinder with a diameter of 165.2 mm and a height of 500 mm. Variations are performed on

Reynolds Number = 9.7×10^4 ; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 and cylinder position of buffer in direction of perpendicular wind direction (y/D) 0; 0.25; 0.5 which is calculated based on freestream (U) velocity and turbine characteristic length $L = 2D - b - 2t$ (b is the shaft diameter). Wind speed is measured using an anemometer, turbine rotation measured by tachometer, static torque of turbine measured by torque meter, turbine dynamic torque measured by brake dynamometer and turbine power obtained from multiplication of turbine dynamic torque with turbine spin.

The result of this experiment study show that compared to the conventional Savonius wind turbine the addition of the disturbance cylinder with size $d/D = 1$ and $S/D = 2.0$ effectively improves the performance of the Savonius wind turbine. This is indicated by the increase in the value of rotation (n), Coefficient of Power (CoP), Coefficient of Moment (C_m), and static torque (T_s) Savonius wind compared to Savonius wind turbine that are not given the disturbance cylinder. The largest increase in rotation is obtained at $y/D = 0.5$ for Reynolds Number = 17.8×10^4 at 1.03 times. The highest coefficient of power value is obtained at $y/D = 0.5$ for Reynolds Number 17.8×10^4 at 1.17 times. The highest coefficient of moment value is obtained at $y/D = 0.5$ for Reynolds Number 14.5×10^4 at 1.13 times. The largest minimum static torque value is obtained at $y/D = 0.5$ for Reynolds Number 14.5×10^4 of 0.84 times

Keywords : *Savonius turbine, cylinder obstacle, coefficient of power, coefficient of moment, static torque, rotation, reynolds number, comparison S/D , comparison y/D*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius** “Studi Kasus $d/D = 1,0$; Jarak $S/D = 2,0$; *Reynolds Number* (Re) = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ” ini dengan baik dan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik karena bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis.
2. Orang tua penulis, Papa Edy Purwanto dan Mama Yustina Ratna atas segala doa, semangat dan bantuannya tanpa henti serta kepada adik penulis, Hanum Ratna yang telah memberikan bantuan dalam hal apapun pada pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA yang selalu memberikan bimbingan, arahan serta menjadi panutan bagi penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
4. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng, Ph.D, Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, dan Vivien Suphandani, ST., ME., Ph.D, selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang tugas akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan yang bermanfaat, sehingga tugas akhir ini bisa selesai dengan baik.
5. Kelompok 4.3 Mas Pant-ek, Mas Yuyung, dan Neng Riri yang selalu memberikan warna (obrolan yang tidak bermanfaat) pada setiap pengambilan data dan pengerjaan TA.

6. Teman seperjuangan kelompok 4 lainnya Clarissa, Eka, Meika, Elsa, Vita, Ammar, Jasmi, Linun yang memberikan drama serta plot twist yang sangat indah.
7. Teman Omdo, Riri, Fitri, Tam, Angel, Hanun, Ucha, Bela, dan Pingkan yang menyemangati penulis tanpa henti serta memberikan informasi terbaru disekitar Mesin.
8. Abang GoFood dan GrabFood yang tanpa lelah mengantarkan order saya hingga subuh menjelang.
9. Teman-teman lab Simanu yang telah memperbolehkan penulis mengerjakan tugasnya di tempat tersebut.
10. Ketua lab Mekanika Fluida cabang Simanu, Mas Jagang yang membuat malam di Simanu semakin penuh canda tawa
11. Teman-teman BSO, Hanif, Tam, Betti, dan Faiq yang telah memberikan pengalaman organisasi yang luar biasa
12. Seseorang yang menemani penulis dalam suka dan duka selama empat tahun di Mesin.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan keterbatasan yang terdapat dalam penulisan Tugas Akhir ini. Sehingga penulis sangat mengharapkan segala bentuk kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak pada umumnya dan khususnya bagi penulis sendiri.

Surabaya,
Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
DAFTAR PUSTAKA	xxi

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4. Batasan Masalah	6
1.5. Manfaat Penelitian	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Angin.....	9
2.2. Turbin Angin Savonius	10
2.3. Bilangan Reynolds	11
2.4. Gaya <i>Drag</i>	12
2.5. Aliran Melewati Silinder.....	13
2.6. Daya Turbin	14
2.7. <i>Tip Speed Ratio</i>	16
2.8. <i>Coefficient of Power</i>	18
2.9. <i>Coefficient of Moment</i>	18
2.10. Penelitian Terdahulu.....	18
2.10.1. Penelitian tentang Silinder Pengganggu	18
2.10.2. Penggunaan Plat Penghalang untuk Meningkatkan Performa Turbin Angin Savonius 21	
2.10.3. Optimalisasi Bentuk Sudu Turbin Angin Savonius dengan Penggunaan Penghalang di Depan Returning Blade	24

2.10.4. Optimalisasi Performa Turbin Savonius Menggunakan Plat Penghalang di Depan Returning Blade	26
2.10.5. Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Plat Penghalang pada Variasi Panjang Plat dan Bilangan Reynolds	28
2.10.6. Studi Numerik Peningkatan Performa Turbin dari Turbin Angin Savonius dengan Plat Datar Penghalang	31
2.10.7. Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius	34

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Analisa dimensi.....	37
3.1.1. Analisa Dimensi <i>Coefficient of Moment</i>	38
3.1.2. Analisa Dimensi <i>Coefficient of Power</i>	41
3.2. Peralatan.....	44
3.2.1. Axial Fan	44
3.2.2. Turbin Angin Savonius	45
3.2.3. Silinder Penghalang	45
3.2.4. Penyangga Turbin Angin Savonius	46
3.2.5. Honeycomb	47
3.2.6. Alat Ukur	48
3.3. Prosedur penelitian.....	58
3.4. Flowchart penelitian.....	57
3.5. Alokasi waktu penelitian.....	61
3.6. Hasil Penelitian	61

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Contoh Perhitungan	63
4.1.1. Perhitungan Reynolds Number	63
4.1.2. Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	65
4.1.3. Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i>	65
4.1.4. Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	66

4.2. Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Penggangu terhadap Variasi Reynolds Number sebesar $9,3 \times 10^4$; 14×10^4 ; dan 17×10^4	66
4.3. Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Penggangu terhadap Variasi <i>Tip Speed Ratio</i> 68	
4.4. Analisis <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Penggangu terhadap Variasi <i>Tip Speed Ratio</i> 69	
4.5. Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Penggangu terhadap Variasi Sudut	70
4.6. Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Dengan Penggangu Silinder Sirkular terhadap Reynolds <i>Number</i> dengan Variasi y/D	72
4.7. Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Dengan Penggangu Silinder Sirkular terhadap Variasi <i>Tip Speed Ratio</i>	77
4.8. Analisis <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius Dengan Penggangu Silinder Sirkular terhadap Variasi <i>Tip Speed Ratio</i>	83
4.9. Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penggangu Silinder Sirkular terhadap Variasi Sudut 87	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	93
5.2. Saran	94
LAMPIRAN A	95
LAMPIRAN B	97
LAMPIRAN C	99
LAMPIRAN D	101
LAMPIRAN E	103

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis turbin angin berdasarkan letak sumbu putar (Spera, David A. 2009)	9
Gambar 2.2 Turbin Angin Savonius (Mohamed et al, 2010). 11	
Gambar 2.3 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Inviscid</i> melewati silinder sirkular	13
Gambar 2.4 <i>Free Body Diagram of Brake Dynamometer</i>	16
Gambar 2.5 Grafik Nilai Coefficient of Power sebagai Fungsi Tip Speed Ratio untuk beberapa Turbin Angin (Pritchard, 1998)	17
Gambar 2.6 Skema Instalasai Eksperimen (Igarashi, 1981)... 19	
Gambar 2.7 Aliran yang melewati silinder tandem (Igarashi, 1981).....	19
Gambar 2.8 Grafik pengaruh L/d terhadap nilai koefisien drag (Cd) (Igarashi, 1981)	20
Gambar 2.9 Skema Instalasi Eksperimen (Altan et al, 2009). 21	
Gambar 2.10 Grafik Pengaruh Sudut Plat Penghalang terhadap Torsi (Altan et al, 2009)	22
Gambar 2.11 Perbandingan Nilai Torsi Statis tiap Variasi Plat Penghalang terhadap Posisi Rotor (Altan et al, 2009).....	22
Gambar 2.12 Grafik Perbandingan Torsi dan Daya tiap Plat Penghalang dengan $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$ terhadap Putaran Rotor (Altan et al, 2009).....	23
Gambar 2.13 Grafik Perbandingan Nilai Power Coefficient Plat Penghalang 1 Dengan $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$ Terhadap Putaran Rotor (Altan et al, 2009).....	23
Gambar 2.14 Skema Turbin Savonius dengan Sudu Konvensional dan Sudu Optimal (Mohamed et al, 2010)	24
Gambar 2.15 Skema Modifikasi Bentuk Sudu Optimal (Mohamed et al, 2010)	24
Gambar 2.16 Grafik Perbandingan Koefisien Torsi Statis dengan Sudut Rotor (Mohamed et al, 2010).....	25

Gambar 2.17	Grafik Perbandingan , (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya dengan Tip Speed Ratio (Mohamed et al, 2010)	25
Gambar 2.18	Skema Instalasi Dua dan Tiga Sudu Turbin Angin Savonius (Mohamed et al, 2010)	26
Gambar 2.19	Grafik Pengaruh Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu terhadap, (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya (Mohamed et al, 2010)	27
Gambar 2.20	Grafik Pengaruh Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu terhadap, (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya (Mohamed et al, 2010)	27
Gambar 2.21	Perbandingan Aliran saat Self Starting pada (a) Turbin Dua Sudu; (b) Turbin Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)	28
Gambar 2.22	Skema penelitian dengan plat penghalang (Triyogi et al, 2017))	29
Gambar 2.23	Grafik Perbandingan putaran (N/No) terhadap variasi panjang plat (S/D) untuk Re = 30.000 dan 90.000 (Triyogi et al, 2017)	29
Gambar 2.24	Grafik Perbandingan Coefficient of Power (CoP/CoPo) terhadap variasi panjang plat penghalang (S/D) untuk Re = 30.000 dan 90.000 (Triyogi et al, 2017)	30
Gambar 2.25	Skema Penelitian (Triyogi et al, 2017)	31
Gambar 2.26	Hasil simulasi vektor kecepatan untuk Re = 30.000 (a) dan 90.000 (c). Hasil simulasi kontur tekanan untuk Re = 30.000 (b) dan 90.000 (d) (Triyogi et al, 2017)	32
Gambar 2.27	Hasil simulasi kontur tekanan untuk Re = 30.000 (a) S/D = 1,00, (b) S/D = 1.02, (c) S/D = 1.03, (d) S/D = 1.15, (e). 1.41 and (f) S/D = 2.00 (Triyogi et al, 2017)	33

Gambar 2.28 Hasil simulasi kontur tekanan untuk $Re = 90.000$ (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e). 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Triyogi et al,2017).....	33
Gambar 2.29 Skema Instalasi Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Sirkular (Nawazir, Ielman. 2017)	35
Gambar 2.30 Grafik Fungsi n/n_0 terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)	35
Gambar 2.31 Grafik Fungsi T_{statis}/T_{statis_0} terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)	36
Gambar 2.32 Grafik Fungsi CoP/CoP_0 terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)	36
Gambar 3.1 Skema Penelitian.....	37
Gambar 3.2 Axial Fan CKE SPV-18	44
Gambar 3.3 Turbin Angin Savonius	45
Gambar 3.4 Silinder Penghalang	46
Gambar 3.5 Penyangga Turbin Angin Savonius.....	46
Gambar 3.6 Honeycomb	47
Gambar 3.7 Skema Instalasi Axial Fan, Honeycomb, Inverter, Silinder Penghalang dan Turbin Angin Savonius	47
Gambar 3.8 Voltage Regulator Model TDGC 2J-3	48
Gambar 3.9 Tachometer OMEGA HHT12.....	49
Gambar 3.10 Anemometer OMEGA HHT141	50
Gambar 3.11 Torque meter Statis LUTRON TQ-8800	51
Gambar 3.12 Multimeter CODY DT-9205A.....	52
Gambar 3.13 Skema <i>Brake dynamometer</i>	53
Gambar 3.14 Benang Nilon LAZER	54
Gambar 3.15 Massa Pemberat	55
Gambar 3.16 Neraca Pegas NAGATA	56
Gambar 3.17 Flowchart Penelitian Turbin Savonius.....	60

- Gambar 4.1** Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (n_o) terhadap Reynolds Number. 67
- Gambar 4.2** Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_o) terhadap *Tip Speed Ratio* 67
- Gambar 4.3** Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (Cm_o) terhadap *Tip Speed Ratio* 70
- Gambar 4.4** Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (Ts_o) terhadap Sudut..... 71
- Gambar 4.5** Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds Number pada $y/D = 0$ 73
- Gambar 4.6** Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds Number pada $y/D = 0,25$ 74
- Gambar 4.7** Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds Number pada $y/D = 0,5$ 76
- Gambar 4.8** Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ 78
- Gambar 4.9** Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ 79
- Gambar 4.10** Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ 81
- Gambar 4.11** Grafik *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ 83
- Gambar 4.12** Grafik *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ 85
- Gambar 4.13** Grafik *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ 86

Gambar 4.14	Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds <i>Number</i> = $9,7 \times 10^4$	88
Gambar 4.15	Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds <i>Number</i> = $14,5 \times 10^4$	89
Gambar 4.16	Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds <i>Number</i> = $17,8 \times 10^4$	91
Gambar A.1	Grafik Keseragaman Alir Horizontal pada Jarak 2250m	95
Gambar A.2	Grafik Keseragaman Alir Vertikal pada Jarak 2250m	96

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data <i>drag coefficient</i> untuk beberapa benda pada $Re > 10^3$ (Pritchard, Philip J. 2011)	13
Tabel 3.1 Dimensi Primer Tiap Parameter Cm	39
Tabel 3.2 Dimensi Primer Tiap Parameter CoP	41
Tabel 3.3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18	44
Tabel 3.4 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC 2J-3 ...	48
Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12	49
Tabel 3.6 Spesifikasi Anemometer OMEGA HHF141	50
Tabel 3.7 Spesifikasi <i>Torque meter Statis</i> LUTRON TQ-8800	51
Tabel 3.8 Spesifikasi Multimeter CODY DT-9205A	52
Tabel 3.9 Spesifikasi Benang Nilon LAZER.....	54
Tabel 3.10 Spesifikasi Massa Pemberat	55
Tabel 3.11 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA	56
Tabel 3.12 Waktu Pelaksanaan Penelitian.....	61
Tabel A.1 Data Kecepatan Angin Horizontal pada Jarak 2250m	95
Tabel A.2 Data Kecepatan Angin Vertikal pada Jarak 2250m.	96
Table B.1 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$	97
Table B.2 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$	97
Table B.3 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$	98
Table B.4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang	98
Table C.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$	99
Table C.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$	99
Table C.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$	100
Table D.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$	101

Table D.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds <i>Number</i> = $14,5 \times 10^4$	101
Table D.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds <i>Number</i> = $17,8 \times 10^4$	102
Table E.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds <i>Number</i> = $9,7 \times 10^4$	103
Table E.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds <i>Number</i> = $14,5 \times 10^4$	103
Table E.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds <i>Number</i> = $17,8 \times 10^4$	104
Table E.4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$	104

DAFTAR SIMBOL

D	diameter sudu turbin Savonius (m)
H	tinggi turbin Savonius (m)
A	luas permukaan turbin yang dikenai oleh angin (m^2)
d	diameter silinder sirkular pengganggu (m)
j	panjang silinder sirkular pengganggu (m)
t	tebal sudu turbin angin Savonius (m)
b	diameter <i>shaft</i> (m)
y	jarak silinder pengganggu tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
S	jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (m)
L	panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)
Cd	<i>drag coefficient</i>
Fd	gaya drag (N)
Pw	daya angin (Watt)
P _T	daya aktual turbin (Watt)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
Cm	<i>Coefficient of moment</i>
n	putaran poros turbin (rpm)
τ	torsi dinamis turbin (N.m)
F	gaya yang bekerja pada poros turbin (N)
m	massa pemberat (kg)
s	pegas yang terbaca (kg)
g	percepatan gravitasi (m/s^2)
Re	<i>Reynolds Number</i>
U	kecepatan <i>free stream</i> (m/s)
ρ	densitas fluida (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (Ns/m^2)
TSR	<i>tip speed ratio</i>
ω	kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber daya fosil yang banyak. Menurut buku **Outlook Energi 2017**, sumber daya yang banyak diikuti pula dengan konsumsi energi fosil yang tinggi pada berbagai sektor perekonomian seperti sektor rumah tangga, sektor perindustrian, dan sektor transportasi. Pada tahun 1995-2015 cadangan minyak bumi semakin berkurang dari 5,9 miliar barel menjadi 3.7 miliar barel. Dengan konsumsi energi fosil yang tinggi dan tidak ada penemuan cadangan minyak bumi baru, cadangan minyak bumi akan habis pada kurun waktu 11 tahun. Begitupula dengan cadangan batu bara yang diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 70 tahun jika tidak ditemukan cadangan baru batu bara. Krisis cadangan minyak bumi dan batu bara akan berdampak buruk bagi perekonomian Indonesia sebagai negara pengguna dan pengekspor energi fosil. Sehingga dibutuhkan solusi penggunaan energi alternatif untuk menekan angka penggunaan energi fosil.

Energi alternatif mulai dilihat oleh negara-negara maju, termasuk Indonesia. Indonesia sangat berpotensi dalam penggunaan energi alternatif jika dilihat dari kondisi geografis, salah satunya energi angin. Menurut **Badan Pusat Statistik**, kecepatan angin di Indonesia rata-rata berkisar antara 0,5125 m/s sampai 4,49 m/s dengan provinsi Nusa Tenggara Barat yang dilalui angin dengan kecepatan tertinggi dari data tahun 2000 sampai 2010. Dengan kondisi seperti ini, Indonesia cocok untuk penerapan energi angin. Energi angin dapat dikoversikan menjadi energi listrik dengan bantuan turbin angin dan generator sehingga tidak menimbulkan polusi udara. Salah satu contoh turbin angin yang dapat digunakan pada kecepatan angin rendah adalah turbin angin Savonius.

Turbin Savonius adalah turbin angin dengan tipe *Vertical-Axis Wind Turbin* (VAWT) diciptakan oleh Sigurd Johannes

Savonius pada tahun 1920-an. Konsep dari turbin Savonius konvensional adalah plat silinder dipotong menjadi dua bagian sepanjang garis tengah kemudian digerakkan sehingga penampang melintang plat silinder menyerupai huruf S. Turbin Savonius memiliki dua buah sudu yang disebut *advancing blade* dan *returning blade*. Saat angin bertiup akan memberikan gaya *drag* yang berbeda pada *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan gaya *drag* akan menghasilkan torsi dan dapat dikonversikan menjadi daya. Semakin besar perbedaan gaya maka torsi dan daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Turbin Savonius memiliki efisiensi paling rendah diantara turbin angin lainnya. Sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius.

Penelitian tentang meningkatkan performa turbin Savonius telah banyak dilakukan. Salah satunya adalah penelitian tentang dilakukan meningkatkan performa turbin Savonius dengan memberikan plat penghalang di depan *convex blade* dan plat pengarah disamping *conceve blade* oleh **Altan, B.D et al(2009)** Penelitian ini menganalisa secara eksperimen dan numerik dengan variasi sudut plat penghalang (α), panjang plat penghalang (l_1), sudut plat pengarah (β), panjang plat pengarah (l_2), posisi sudut rotor (ϕ). Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah peningkatan C_p (*power output coefficient*) sebesar 38,5% pada $\alpha = 45^\circ$, $l_1 = 45\text{cm}$, $\beta = 15^\circ$, $l_2 = 52\text{cm}$, $\phi = 60^\circ$.

Pada penelitian tentang turbin Savonius yang lainnya **Mohamed, M.H. et al(2010)** melakukan optimalisasi turbin Savonius dua sudu dan tiga sudu dengan memberikan penghalang di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dengan variasi sudut penghalang (β) dan *speed ratio* (α). Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah peningkatan C_p (*power output coefficient*) sebesar 27,3% pada turbin Savonius dengan dua sudu dan peningkatan C_p (*power output coefficient*) sebesar 27,5% pada turbin Savonius dengan tiga sudu. Melihat perbedaan pada nilai C_p (*power output coefficient*), harga pembuatan, serta kemudahan merakit alat disimpulkan

bahwa turbin Savonius dengan dua sudu lebih baik daripada turbin Savonius tiga sudu.

Penelitian turbin Savonius lainnya oleh **Mohamed, M.H. et al(2010)** tentang optimalisasi bentuk sudu dari turbin Savonius yang dimodifikasi dengan memberikan penghalang di depan *returning blade* . Penelitian ini menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dengan variasi *speed ratio* (λ) serta melihat pada enam titik yang sudah ditentukan. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah peningkatan C_p (*power output coefficient*) sebesar 38,9% pada $\lambda = 0,7$, performa naik sebesar 30% pada $0,3 \leq \lambda \leq 1,4$, dan kenaikan torsi sebesar 75,4% pada $\lambda = 1,4$ dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional.

Studi tentang meningkatkan performa turbin Savonius dengan silinder sirkular pengganggu di depan *returning blade* dilakukan juga oleh **(Nawazir, Ielman. 2016)**. Penelitian ini menganalisa secara eksperimen dengan variasi S/D antara 1,5 – 2,4 dan nilai bilangan Reynolds sebesar 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 . Hasil yang didapatkan dari studi eksperimen ini menunjukkan bahwa penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Peningkatan optimal terjadi pada S/D sebesar 1,6. Nilai coefficient of power yang paling besar diperoleh pada S/D = 1,6 untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ sebesar 25,05%. Nilai maksimum coefficient of power diperoleh pada nilai tip speed ratio sebesar 0,95. Sementara kecepatan putaran dari turbin angin Savonius yang diperoleh pada S/D = 1,6 untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ memiliki nilai sebesar 472,63 rpm dengan torsi statis yang diperoleh sebesar 8,8 N-cm

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diatas, maka penelitian tentang turbin Savonius yang diberi silinder penghalang di depan *returning blade* pada penelitian ini penting untuk dilakukan. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen yang menggunakan variasi Reynolds *Number* tiap posisi silinder penghalang dalam arah transversal atau tegak lurus arah datangnya angin terhadap turbin angin Savonius (y/D) yang akan dilakukan pada aliran eksternal untuk meningkatkan performa turbin

Savonius dengan meletakkan silinder penghalang di depan *returning blade*.

1.2. Rumusan Masalah

Sudu pada turbin Savonius berputar memanfaatkan selisih nilai gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Selisih ini dikarenakan nilai C_d (*Coefficient drag*) pada *advancing blade* lebih besar dibandingkan dengan nilai C_d pada *returning blade*. Semakin besar selisih gaya *drag* pada turbin Savonius maka torsi akan semakin meningkat. Dengan peningkatan torsi yang dihasilkan maka daya yang di hasilkan turbin Savonius akan semakin meningkat. Salah satu cara untuk memperbesar selisih gaya *drag* dengan memberikan silinder penghalang di depan *returning blade*.

Pemasangan silinder penghalang akan memperkecil gaya *drag* yang pada *returning blade*. Hal ini akan memperbesar selisih gaya *drag* yang terjadi pada turbin Savonius. Peningkatan selisih gaya *drag* akan meningkatkan torsi yang dihasilkan turbin Savonius sehingga daya yang dihasilkan akan semakin meningkat.

Penelitian ini akan menganalisa pengaruh peletakan silinder sirkuler berdiameter d di depan *returning blade*, dengan variasi posisi silinder tegak lurus arah angin datang (y/D). Hipotesa awal yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan *returning blade* efektif mengurangi gaya *drag* sisi sudu *returning* pada turbin Savonius karena *wake* dari silinder penghalang akan mengenai sudu *returning* dan menyebabkan transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen pada *returning blade* akan cepat terjadi. Akhirnya titik separasi akan lebih mundur dan *wake* yang terbentuk akan menyempit. Sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan berkurang dan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* semakin besar. Dengan semakin besar selisih gaya *drag* maka torsi yang dihasilkan akan semakin besar serta adanya peningkatan daya dari turbin Savonius

2. Variasi posisi silinder penghalang dalam arah transversal atau tegak lurus arah datangnya angin terhadap turbin angin Savonius (y/D) dimaksudkan untuk mendapatkan posisi optimum dimana *wake* dari silinder pengganggu secara efektif menunda titik separasi dari sudu *returning* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* sudu *returning* semakin mengecil dan menyebabkan selisih gaya *drag* pada kedua sudu semakin besar. Di sisi lain, silinder pengganggu pada posisi (y/D) tertentu diduga dapat berpengaruh untuk lebih mengarahkan aliran udara ke sisi sudu *advancing*, sehingga gaya *drag* dari sudu *advancing* meningkat seiring dengan pergerakan posisi y menuju sudu *advancing* hingga titik optimumnya. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga nilai torsi, daya, dan *coefficient of power* (CoP) akan meningkat hingga jarak y optimum kemudian kembali menurun setelah melewati jarak y optimum.
 3. Penempatan silinder pengganggu dengan diameter sama besar dengan diameter sudu *returning* turbin angin Savonius $d/D = 1$ diduga mempengaruhi tekanan total antara daerah didepan dan belakang sudu *returning*. Tekanan didepan silinder pengganggu menjadi lebih kecil dibandingkan pada daerah dibelakang sudu *returning*. Hal ini menyebabkan gaya *drag* bernilai negatif pada bagian sudu *returning* sehingga selisih gaya *drag* pada sudu *returning* dan *advancing* meningkat. Dengan semakin besar selisih *drag* maka putaran, torsi, dan *coefficient of power* (CoP) yang dihasilkan akan semakin besar.
- Untuk membuktikan hipotesa tersebut maka dilakukan studi eksperimen dengan menggunakan turbin Savonius berdiameter sudu (D) serta silinder penghalang dengan rasio perbandingan dengan diameter turbin (d/D) sebesar 1. Variasi Reynolds Number yang digunakan sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ dan posisi silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (y/D) sebesar 0; 0,25; 0,5

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan meletakkan silinder penghalang di depan *returning blade* dengan menganalisa pengaruh variasi Reynolds Number yang digunakan sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ dan posisi silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (y/D) sebesar 0; 0,25; 0,5. Penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Mengukur putaran dari turbin Savonius saat dialirkan udara
2. Mengukur torsi statis dari turbin Savonius saat dialirkan udara
3. Mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius saat dialirkan udara
4. Menghitung C_m (*Coefficient of Moment*) dan CoP (*Coefficient of Power*) dari turbin Savonius

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini agar hasil yang didapat sesuai dengan tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Udara yang mengalir pada sisi inlet merupakan udara dengan kondisi *steady*, *incompressible*, dan *uniform*
2. Analisa yang dilakukan pada turbin angin Savonius dengan diameter
3. Rasio silinder penghalang yang diletakan di depan *returning blade* (S/D) sebesar 2,0 dan rasio diameter penghalang dengan diameter sudu (d/D) sebesar 1,0
4. Analisa dilakukan dengan aliran udara satu arah
5. Posisi silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (y/D) yang digunakan sebesar 0; 0,25; 0,5
6. Reynolds Number yang digunakan sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$
7. Perpindahan panas diabaikan

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan didapatkan dari penelitian penambahan silinder penghalang di depan *returning blade* adalah sebagai berikut:

1. Mampu menjelaskan pengaruh pemberian silinder penghalang di depan *returning blade* terhadap nilai torsi, putaran, C_m (*Coefficient of Moment*) dan CoP (*Coefficient of Power*) pada turbin Savonius
2. Mampu menjelaskan pengaruh variasi posisi silinder penghalang dalam arah transversal atau tegak lurus arah datangnya angin terhadap turbin angin Savonius terhadap nilai torsi, putaran, C_m (*Coefficient of Moment*) dan CoP (*Coefficient of Power*) pada turbin Savonius

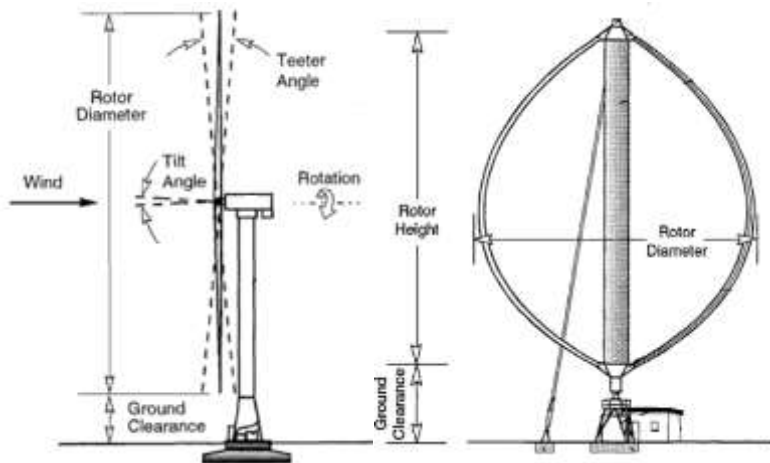
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Angin

Turbin angin adalah mesin yang berkerja untuk mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik. Energi kinetik angin memutar sudu turbin angin yang dihubungkan ke poros. Poros turbin angin digabungkan ke generator listrik yang kemudian mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Berdasarkan letak sumbu putarnya, turbin angin dibedakan menjadi *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) ditunjukkan pada gambar 2.1.



Horizontal Axis Wind Turbine

Vertical Axis Wind Turbine

Gambar 2.1 Jenis turbin angin berdasarkan letak sumbu putar
(Spera, David A. 2009)

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) merupakan turbin angin dengan sumbu putar sejajar dengan permukaan tanah. Saat angin mengenai sudu turbin angin yang berbentuk airfoil akan mengakibatkan gaya angkat (*lift*) dan menghasilkan putaran pada

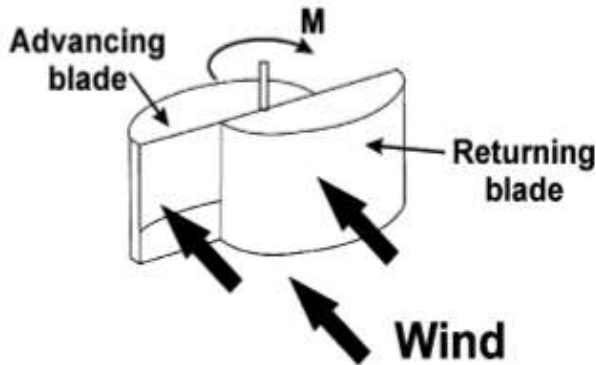
turbin sehingga memudahkan konversi energi kinetik angin menjadi putaran. Pada umumnya turbin jenis ini memiliki konstruksi menara yang tinggi dan besar untuk menghasilkan efisiensi yang tinggi. Semakin tinggi menara turbin, kecepatan angin yang menumbuk sudu turbin akan semakin tinggi. Sehingga efisiensi ang dihasilkan akan semakin besar. Namun, semakin besar dan tinggi konstruksi dari turbin angin jenis ini, biaya instalasi dan berat turbin angin akan semakin besar. Hal ini dikarenakan penambahan penyeimbang pada bagian atas menara sebagai tempat meletakkan gearbox, sudu, dan generator. Kekurangan lainnya pada turbin angin jenis ini adalah diperlukan sistem kontrol tambahan untuk mengatur sudu turbin ke arah angin datang.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbin angin dengan sumbu putar tegak lurus dengan permukaan tanah. Desain yang paling terkenal dari VAWT adalah jenis turbin Darrieus. Selain itu terdapat desain lain seperti, turbin tipe rotor H-Darrieus dan turbin tipe rotor Savonius. VAWT memiliki struktur dan pemasangan yang lebih sederhana dari pada HAWT karena tidak membutuhkan konstruksi menara yang tinggi dan besar. Kelebihan lainnya dari turbin jenis ini yaitu, generator ditempatkan di bagian bawah poros pusat di permukaan tanah, tidak diperlukan sistem kontrol tambahan untuk mengarahkan sudu turbin searah dengan arah angin datang, dan dapat berkerja pada kecepatan dan arah angin yang berbeda. Namun, efisiensi yang dihasilkan VAWT lebih rendah dibandingkan dengan HAWT.

2.2. Turbin Angin Savonius

Turbin angin jenis Savonius, yang juga disebut S-rotor, merupakan salah satu jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) pada awalnya ditemukan dan dipatenkan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1920an. Turbin ini dibuat dari plat silinder yang dipotong menjadi dua bagian sepanjang bidang tengah kemudian menggerakkan kedua plat silinder ke samping sepanjang bidang pemotongan seperti huruf S seperti yang ditunjukkan pada gambar

2.2. Pada turbin Savonius konvensional terdapat dua buah sudu, yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Kecepatan angin yang menumbuk permukaan sudu menimbulkan gaya *drag* yang berbeda dimana gaya *drag* pada *advancing blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *returning blade*. Selisih gaya *drag* menghasilkan torsi dan daya. Kelebihan turbin Savonius yaitu, kemampuan untuk beroperasi pada kecepatan angin rendah dan konstruksi turbin yang sederhana sehingga biaya yang diperlukan murah dibandingkan jenis turbin yang lainnya. Namun turbin Savonius memiliki efisiensi paling rendah dibandingkan dengan turbin Darrieus.



Gambar 2.2 Turbin Angin Savonius (Mohamed, M.H. et al 2010)

2.3. Reynolds Number

Reynolds Number (Re) ditemukan oleh Osborne Reynolds paada tahun 1880an yang mempelajari transisi antara aliran laminar dan aliran turbulen merupakan bilangan tak berdimensi yang diperoleh dari rasio antara gaya inersia dan gaya viscous dimana parameter yang digunakan adalah massa jenis fluida (ρ), kecepatan aliran fluida (U_∞), viskositas dinamik fluida (μ), dan panjang karakteristik (L). Re digunakan untuk menentukan aliran laminar atau aliran turbulen dari fluida yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} = \frac{\rho \times U_{\infty} \times L}{\mu} \quad (2.1)$$

Dalam penelitian turbin Savonius ini, panjang karakteristik pada pada sudu turbin dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$L = 2D - b - 2t \quad (2.2)$$

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot (2D - b - 2t)}{\mu} \quad (2.3)$$

Dimana:

- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- U_{∞} : kecepatan aliran *free stream* fluida (m/s)
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- b : diameter *shaft* (m)
- μ : viskositas dinamik fluida (N.s/m^2)
- t : tebal sudu turbin angin Savonius (m)

2.4. Gaya Drag

Drag adalah komponen gaya pada benda yang bekerja secara paralel terhadap arah aliran. Gaya *drag* adalah penjumlahan dari gaya gesek dan tekanan dari aliran fluida pada permukaan benda, dirumuskan sebagai berikut:

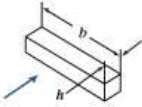






$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \quad (2.4)$$

keterangan:

- F_D : Gaya *drag* (N)
- C_D : *Drag coefficient*
- ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
- U : Kecepatan aliran fluida (m/s)
- A : Luas penampang benda yang dialiri fluida

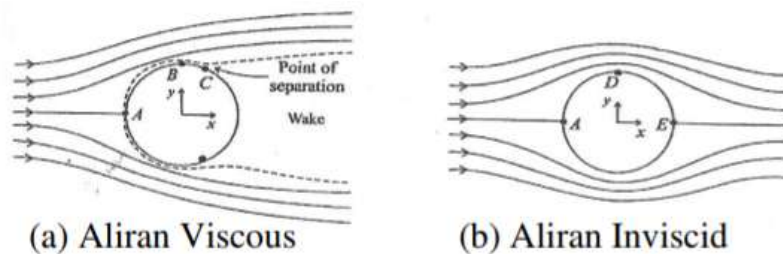
Pada rumus gaya *drag* terdapat parameter C_d (*drag coefficient*) yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds yang besarnya tergantung pada geometri dari benda yang dialiri fluida. Pada geometri yang umum digunakan dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Data drag coefficient untuk beberapa benda pada $Re > 10^3$ (Pritchard, Philip J. 2011)

Object	Diagram	$C_D(Re \approx 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05 $b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

2.5. Aliran Melewati Silinder

Aliran inkompresibel yang melewati silinder dapat dilihat pada gambar 2.4:



Gambar 2.3 Aliran *viscous* dan *inviscid* melewati silinder sirkular

Pada **Gambar 2.3a** menunjukkan *streamline* pada aliran viscous di silinder. Titik A adalah titik stagnasi yang selanjutnya terjadi boundary layer. Dari titik A ke titik B terjadi kenaikan kecepatan yang berakibat penurunan tekanan dan selanjutnya dari titik B ke titik C terjadi penurunan kecepatan dimana tekanan di titik C lebih besar dari tekanan di titik B. Di titik C momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser sehingga menyebabkan separasi. Titik C biasa disebut *point of separation*. Saat aliran yang berada dekat *wall* tidak mampu melawan tegangan geser yang terjadi maka aliran akan kehabisan momentum untuk tetap berada pada jalur *streamline*. Sehingga aliran akan berada pada daerah diantara aliran yang masih mempunyai momentum. Daerah ini disebut *wake*. Semakin besar *wake* yang terjadi maka semakin besar perbedaan gaya didepan dan dibelakang silinder yang berakibat semakin besar tegangan geser yang terjadi pada aliran silinder. Aliran *inviscid* digambarkan pada **gambar 2.3b** terlihat bahwa pada silinder tidak terdapat daerah *wake* sehingga tidak terjadi tegangan geser pada aliran, terjadi slip pada permukaan silinder dan perbedaan besar kecilnya kecepatan aliran ditunjukkan oleh rapat longgarnya *streamlines* yang ada

2.6. Daya Turbin

Turbin angin merupakan mesin pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik sehingga menggerakkan sudu turbin yang selanjutnya dapat menghasilkan energi listrik. Sesuai dengan hukum Betz, daya maksimum teoritis turbin diperoleh dari energi kinetik angin. Semakin besar kecepatan angin maka daya yang dihasilkan akan semakin besar. Kecepatan angin setelah menumbuk sudu turbin lebih kecil dibandingkan sebelum menumbuk sudu turbin. Pengurangan kecepatan ini memberikan informasi besar energi yang dikonversikan menjadi energi gerak. Daya angin sebelum menumbuk turbin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_w = E_k = \frac{1}{2} \dot{m} U^2 \quad (2.5)$$

dimana masa udara tiap detik (\dot{m}) dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho U A \quad (2.6)$$

Pada penelitian ini luas penampang (A) merupakan luas permukaan turbin angin Savonius yang ditumbuk oleh angin. Sehingga, daya angin sebelum menumbuk turbin (P_w) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} (\rho U A) U^2 \quad (2.7)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho U^3 (2D - b - t) \cdot H \quad (2.8)$$

keterangan:

P_w : Daya angin total (watt)

E_k : Energi kinetik (Joule)

\dot{m} : Massa udara tiap detik (kg/s)

U : Kecepatan angin (m/s)

ρ : Densitas udara (kg/m³)

A : Luas permukaan turbin yang ditumbuk oleh angin (m²)

D : Diameter sudu turbin (m)

b : Diameter *shaft* (m)

t : Tebal sudu turbin angin Savonius (m)

H : Tinggi turbin (m)

Tidak semua daya angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin. Oleh karena itu daya setelah menumbuk turbin dapat dihitung berdasarkan besar torsi dinamis dan putaran yang dihasilkan turbin yang diukur menggunakan *brake dynamometer*. Hasil pengukuran yang terbaca kemudian dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_T = \tau \cdot \omega \quad (2.9)$$

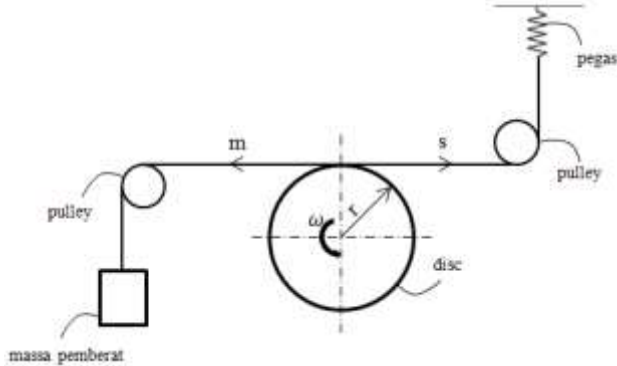
keterangan:

P_T : Daya turbin (watt)

τ : Torsi dinamis turbin (N.m)

ω : putaran turbin (rad/detik)

Brake dynamometer tidak dapat menyajikan nilai torsi dinamis secara langsung. Pengukuran yang dilakukan pada *brake dynamometer* adalah pengukuran massa pemberat dan massa yang terbaca pada pegas. Kemudian nilai torsi dinamis harus dihitung berdasarkan *Free Body Diagram* pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 FBD Brake Dynamometer

Melalui Gambar 2.4, nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tau = \{(s - m)g\} \times r \quad (2.10)$$

dimana:

s : massa yang terbaca pada pegas (kg)

m : massa beban (kg)

g : gravitasi (m/s²)

r : jari-jari silinder yang menerima beban (m)

sehingga persamaan 2.13 menjadi:

$$P_T = (\{(s - m)g\} \cdot r) \cdot \omega \quad (2.11)$$

2.7. Tip Speed Ratio

Tip speed ratio (λ) merupakan parameter penting dalam menentukan besar performa yang dihasilkan turbin angin. TSR dipengaruhi oleh jari-jari, kecepatan rotasi, dan panjang sudu turbin angin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega D}{U} \quad (2.12)$$

keterangan:

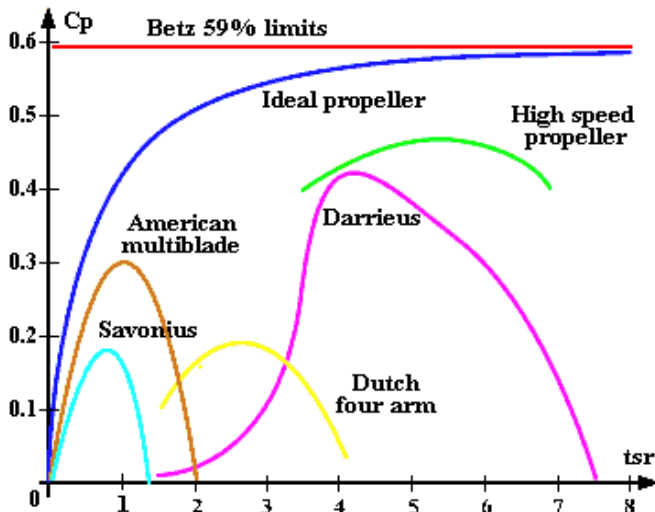
λ : Tip speed ratio

D : Diameter sudu turbin (m)

ω : Kecepatan sudut turbin (rad/detik)

U : Kecepatan angin (m/s)

Menurut Betz, TSR berpengaruh pada *coefficient of power*. Semakin tinggi nilai TSR, *coefficient of power* yang dihasilkan akan semakin meningkat hingga titik optimum. Kemudian *coefficient of power* akan menurun seiring dengan meningkatnya nilai TSR. Pada turbin, *coefficient of power* maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin angin sebesar 0,593 untuk turbin jenis HAWT maupun VAWT. Setiap turbin angin memiliki parameter yang berbeda-beda sehingga akan terjadi perbedaan titik awal kerja pada setiap turbin angin. Titik awal kerja yang lebih rendah menandakan bahwa turbin angin bekerja pada kecepatan yang rendah. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2.5 Grafik Nilai Coefficient of Power sebagai Fungsi Tip Speed Ratio untuk beberapa Turbin Angin (Pritchard, 1998)

2.8. Coefficient of Power

Coefficient of power (CoP) adalah rasio antara daya turbin dengan daya total angin. Nilai CoP menunjukkan besarnya performa yang dihasilkan oleh turbin angin yang bergantung pada *tip speed ratio*. Besar nilai CoP dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{\text{daya yang dihasilkan}}{\text{daya awal}} \quad (2.13)$$

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} = \frac{\tau \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho U^3 (2D-b-t) \cdot H} \quad (2.14)$$

2.9. Coefficient of Moment

Coefficient of moment (Cm) adalah rasio antara torsi yang dihasilkan oleh turbin dengan torsi yang dihasilkan angin terhadap parameter geometri dari turbin angin Savonius. Besar nilai Cm dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Cm = \frac{\tau}{\rho U^2 D (2D-b-t) \cdot H} \quad (2.15)$$

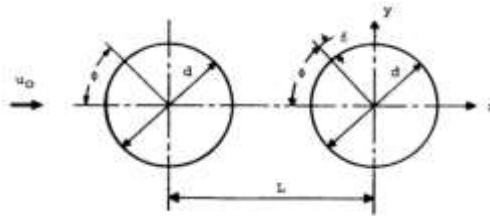
Dimana T pada perhitungan Cm merupakan torsi dinamis.

2.10. Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan studi referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan peningkatan performa turbin angin dengan memberikan penghalang pada *returning blade* secara eksperimen maupun secara simulasi dengan metode *Computational Fluid Dynamics*

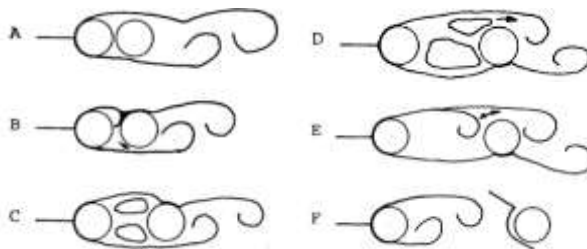
2.10.1. Penelitian tentang Silinder Pengganggu

Penelitian tentang aliran fluida yang melalui sebuah silinder yang diganggu oleh silinder yang memiliki diameter yang sama, dilakukan oleh **Igarashi (1981)**. Silinder sirkular disusun tandem dengan perbandingan diameter $d/D = 1$. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D) yaitu 1,03 - 5,0 dan perubahan Reynolds number pada rentang $8,7 \times 10^3 \leq Re \leq 5,2 \times 10^4$ seperti pada gambar 2.6

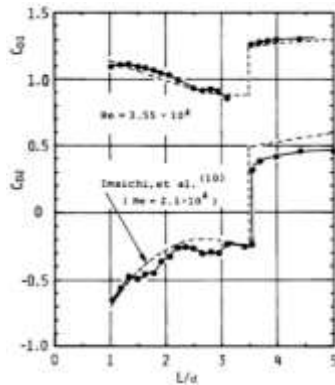


Gambar 2.6 Skema Instalasai Eksperimen (Igarashi, 1981)

Terbentuk beberapa vortex diantara kedua silinder yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati silinder seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Dimana pada gambar bagian A jarak penempatan yang terlalu dekat menjadikan dua buah silinder seperti satu bodi. Pada bagian B dengan variasi jarak tertentu, terdapat pembentukan vortex. Pada bagian C dengan variasi jarak tertentu, terbentuk vortex yang tergolong kedalam bentuk *Quasi-stationary vortex* diantara kedua silinder. Pada bagian D dengan variasi jarak tertentu, *Quasi-stationary vortex* menjadi tidak stabil yang menyebabkan terbentuknya suatu *vortex shedding*. Pada bagian E dengan variasi jarak tertentu, aliran akan terbagi menjadi dua tahap yang pertama akan bergerak menuju silinder utama dan aliran yang kedua akan kembali menuju silinder pengganggu. Pada bagian F dengan variasi jarak tertentu, separasi boundary layer yang terjadi pada sisi upstream silinder akan bergulir kembali ke silinder penghalang di depan sisi *downstream* silinder.



Gambar 2.7 Aliran yang melewati silinder tandem (Igarashi, 1981)



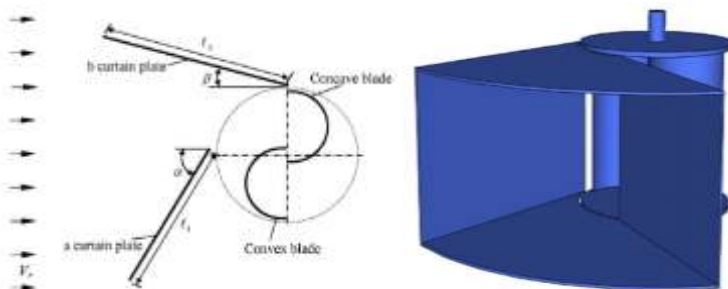
Gambar 2.8 Grafik pengaruh L/d terhadap nilai koefisien drag (C_d) (Igarashi, 1981)

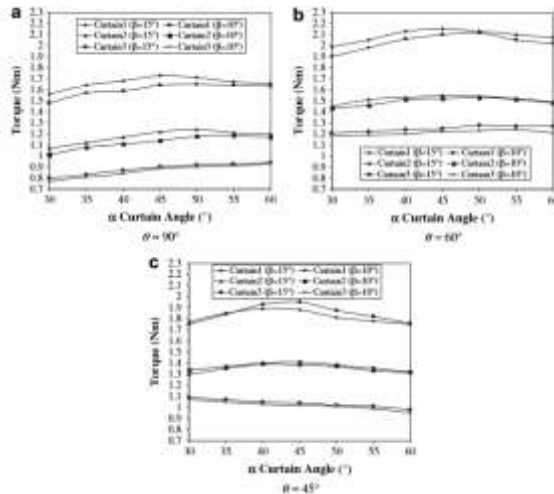
Pada gambar 2.8 diketahui bahwa silinder pertama mengalami penurunan nilai C_d terhadap kenaikan nilai L/d . Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa gaya *drag* yang diterima oleh silinder pertama semakin mengecil seiring penambahan jarak antara kedua pusat silinder. Namun mengalami peningkatan nilai C_d pada posisi $L/d = 3,5$. Silinder kedua atau silinder yang berada di belakang mengalami kondisi yang berbeda. Nilai C_d mengalami peningkatan pada kenaikan besar L/d . Nilai C_d silinder kedua berada pada rentang nilai minus. Hal itu menjelaskan bahwa gaya *drag* yang diterima silinder kedua bekerja dengan arah yang berlawanan dengan arah datangnya aliran fluida. Namun pada jarak $L/d = 3,5$ menghasilkan nilai C_d positif yang menandakan bahwa gaya *drag* yang diterima silinder kedua searah dengan arah datangnya aliran fluida. Dapat disimpulkan dari penelitian ini bahwa penambahan konfigurasi silinder sirkular dengan diameter yang sama di depan sebuah silinder sirkular, mengakibatkan silinder yang berada di belakang mengalami gaya *drag* yang justru berlawanan dengan arah datangnya aliran pada besar $L/d = 1,03 - 3,5$.

2.10.2. Penggunaan Plat Penghalang untuk Meningkatkan Performa Turbin Angin Savonius

Penelitian ini dilakukan oleh **Altan, B.D et al (2009)** dengan metode eksperimen dan numerik yang bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara memberikan sebuah plat penghalang di depan *returning blade* dan *advancing blade* pada turbin angin Savonius. Eksperimen dilakukan dengan variabel sebagai berikut, kecepatan angin rata-rata 7m/s ($Re = 1,5 \times 10^5$), tiga posisi sudut rotor yang berbeda pada $\theta = 45^\circ, 60^\circ$, dan 90° , dan posisi sudut penghalang yang berbeda pada α antara 30° sampai 60° dan $\beta = 10^\circ$ dan 15° . Variasi yang digunakan pada eksperimen ini adalah panjang plat penghalang (ℓ_1 dan ℓ_2) bertujuan untuk mendapatkan panjang plat yang menghasilkan torsi maksimum. Variasi panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) pada plat penghalang 1 adalah 45cm dan 52cm, plat penghalang 2 adalah 34cm dan 39cm, dan plat penghalang 3 adalah 22cm dan 26cm. Skema instalasi pada eksperimen ini dapat dilihat pada gambar 2.9

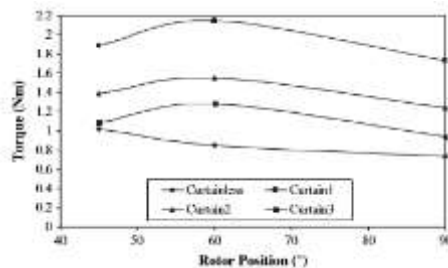
Gambar 2.9 Skema Instalasi Eksperimen (Altan, B.D et al .2009)





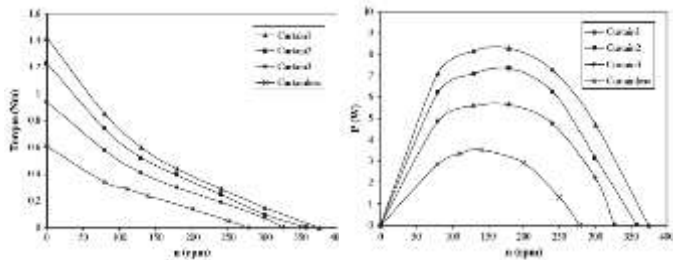
Gambar 2.10 Grafik Pengaruh Sudut Plat Penghalang terhadap Torsi (Altan, B.D et al .2009)

Pada gambar 2.11 terlihat hasil eksperimen yang dilakukan oleh peneliti diketahui bahwa variasi sudut penghalang α dan β berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan. Selain itu variasi panjang plat penghalang pada turbin juga memiliki pengaruh terhadap nilai torsi dan daya yang dihasilkan. Pengaruh yang diberikan oleh panjang plat penghalang terhadap nilai torsi dapat dilihat pada gambar 2.11

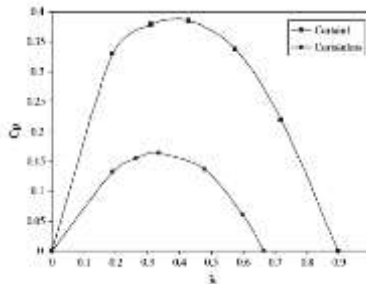


Gambar 2.11 Perbandingan Nilai Torsi Statis tiap Variasi Plat Penghalang terhadap Posisi Rotor (Altan, B.D et al .2009)

Dari gambar 2.10 dan gambar 2.11 didapatkan variasi sudut plat penghalang $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ pada sudut rotor $\theta = 60^\circ$ memiliki torsi terbesar. Kemudian hasil ini di eksperimen dengan variasi panjang plat penghalang, sehingga didapatkan grafik perbandingan torsi dan daya tiap plat penghalang dengan $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$ terhadap putaran rotor gambar 2.11 dan grafik perbandingan nilai *power coefficient* plat penghalang 1 dengan $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$ terhadap putaran rotor pada gambar 2.12



Gambar 2.12 Grafik Perbandingan Torsi dan Daya tiap Plat Penghalang dengan $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$ terhadap Putaran Rotor (Altan, B.D et al .2009)



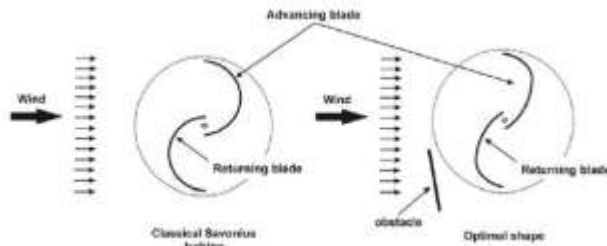
Gambar 2.13 Grafik Perbandingan Nilai Power Coefficient Plat Penghalang 1 Dengan $\alpha=45^\circ$ Dan $\beta=15^\circ$ Terhadap Putaran Rotor (Altan, B.D et al .2009)

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah penambahan plat penghalang didepan turbin angin Savonius mampu meningkatkan torsi turbin angin Savonius sehingga

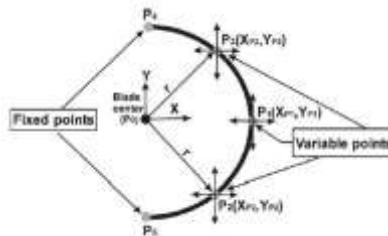
efisiensi yang dihasilkan akan semakin meningkat. Peningkatan *coefficient of power* (CoP) terbesar pada variasi panjang plat penghalang 1 dengan $\ell_1 = 45\text{cm}$ dan $\ell_2 = 52\text{cm}$. Peningkatan CoP yang terjadi sebesar 38,5% pada saat $\theta=60^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\beta=15^\circ$.

2.10.3. Optimalisasi Bentuk Sudu Turbin Angin Savonius dengan Penggunaan Penghalang di Depan *Returning Blade*

M.H. Mohamed (2010) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengoptimalkan performa turbin angin dengan memodifikasi bentuk sudu dan penggunaan penghalang di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dimana sudu turbin yang digunakan adalah sudu berbentuk setengah lingkaran dan bentuk optimal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14



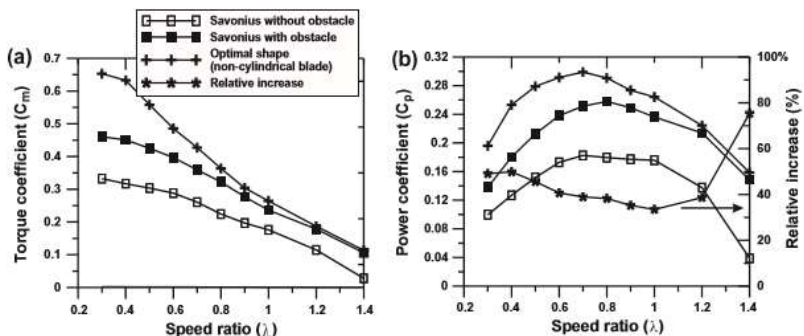
Gambar 2.14 Skema Turbin Savonius dengan Sudu Konvensional dan Sudu Optimal (**Mohamed, M.H. et al 2010**)



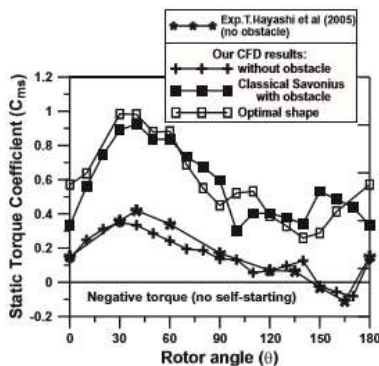
Gambar 2.15 Skema Modifikasi Bentuk Sudu Optimal (**Mohamed, M.H. et al 2010**)

Pada gambar 2.15 bentuk sudu turbin dimodifikasi dengan mengubah posisi titik X_{P1} , Y_{P1} , X_{P2} , Y_{P2} , X_{P3} , dan Y_{P3} sampai mendapatkan bentuk sudu optimal

Simulasi dilakukan menggunakan sudu konvensional dan sudu optimal dengan variasi *tip speed ratio*. Data yang diperoleh dari simulasi ini berupa nilai koefisien torsi, koefisien daya terhadap *tip speed ratio* ditunjukkan pada gambar 2.16 serta koefisien torsi statis terhadap sudut rotor ditunjukkan pada gambar 2.17



Gambar 2.16 Grafik Perbandingan Koefisien Torsi Statis dengan Sudut Rotor (Mohamed, M.H. et al 2010)

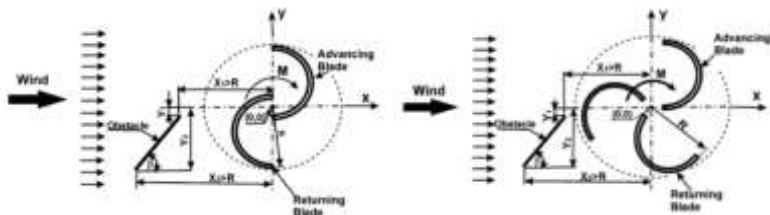


Gambar 2.17 Grafik Perbandingan , (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya dengan Tip Speed Ratio (Mohamed, M.H. et al 2010)

Kesimpulan penelitian ini adalah nilai koefisien torsi, koefisien daya, dan koefisien torsi statis turbin angin dari bentuk sudu optimal dan pemberian penghalang di depan *returning blade* mengalami peningkatan dibandingkan dengan nilai yang diperoleh pada bentuk sudu konvensional. Peningkatan yang terjadi pada daya sebesar 38,9% saat $(\lambda) = 0,7$ dan torsi sebesar 75,4% saat $(\lambda) = 1,4$ dibandingkan dengan turbin angin Savonius konvensional yang tidak terdapat penghalang. Hal ini membuktikan bahwa modifikasi bentuk sudu turbin dan pemberian penghalang di depan *returning blade* mampu meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius

2.10.4. Optimalisasi Performa Turbin Savonius Menggunakan Plat Penghalang di Depan *Returning Blade*

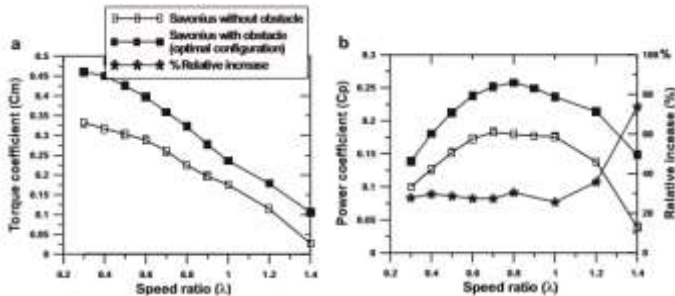
Penelitian lainnya yang dilakukan oleh **M.H. Mohamed (2010)** bertujuan untuk mengoptimalkan turbin angin menggunakan dua dan tiga sudu dengan pemberian penghalang di depan *returning blade*. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah ini adalah besar sudut penghalang (β) dan *tip speed ratio* (λ) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18



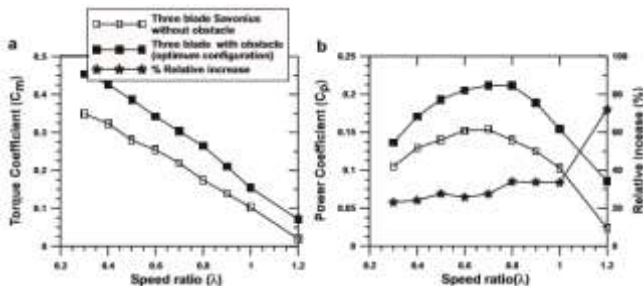
Gambar 2.18 Skema Instalasi Dua dan Tiga Sudu Turbin Angin Savonius (Mohamed, M.H. et al 2010)

Dari hasil simulasi didapatkan data berupa nilai koefisien torsi dan koefisien daya turbin angin Savonius untuk dua dan tiga sudu.

Pengaruh dua dan tiga sudu turbin angin Savonius terhadap koefisien torsi dan koefisien daya ditunjukkan pada gambar 2.19 dan 2.20. Selain itu jumlah sudu turbin angin Savonius mempengaruhi *self starting* pada trubin angin Savonius seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.21



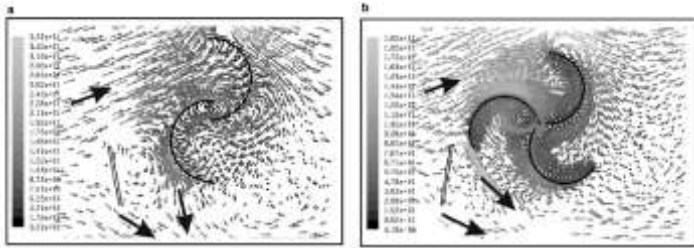
Gambar 2.19 Grafik Pengaruh Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu terhadap, (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya (Mohamed, M.H. et al 2010)



Gambar 2.20 Grafik Pengaruh Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu terhadap, (a) Koefisien Torsi; (b) Koefisien Daya (Mohamed, M.H. et al 2010)

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah terjadi peningkatan 27,3% pada $(\lambda) = 0,7$ dan $(\beta) = 100,8^\circ$ pada turbin angin Savonius dua turbin. Untuk turbin angin Savonius tiga sudu terjadi peningkatan sebesar 27,5% pada $(\lambda) = 0,7$ dan $(\beta) = 80,52^\circ$. Kemampuan *self starting* meningkat karena pemberian

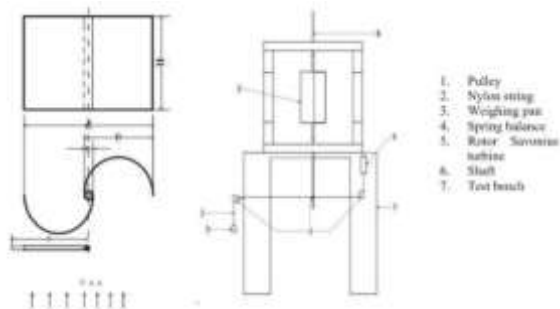
penghalang di depan *returning blade*. Dilihat dari peningkatan koefisien daya yang tidak terlalu jauh berbeda, turbin angin Savonius dianggap lebih baik dibandingkan dengan tiga sudu karena instalasi alat yang lebih mudah dan murah.



Gambar 2.21 Perbandingan Aliran saat Self Starting pada (a) Turbin Dua Sudu; (b) Turbin Tiga Sudu (Mohamed, M.H. et al 2010)

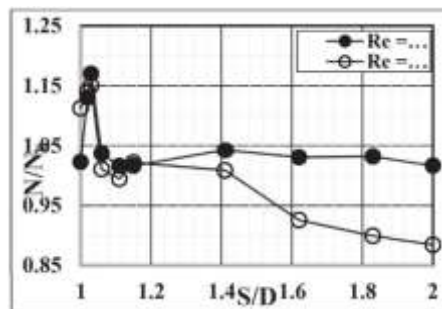
2.10.5. Peningkatan Peforma dari Turbin Savonius dengan Plat Penghalang pada Variasi Panjang Plat dan Bilangan Reynolds

Penelitian tentang Peningkatan Peforma dari Turbin Savonius telah dilakukan oleh **Triyogi et al (2010)** dengan memvariasikan panjang plat penghalang yang diletakan didepan sisi *returning blade* turbin angin Savonius. Variasi panjang plat pada penelitian ini yaitu $S/D = 1,00; 1,02; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83; 2,00$ serta variasi bilangan Reynolds sebesar 30.000 dan 90.000. Penelitian dilakukan dengan skema seperti pada gambar 2.22 dengan panjang sudu turbin (D) sebesar 102 mm, tinggi (H) sebesar 300 mm, dan overlap (b) sebesar 16 mm. Plat penghalang yang digunakan terbuat dari bahan plastik PVC yang memiliki tebal dan panjang 3 mm dan 300 mm. pengukuran torsi dinamis menggunakan *brake dynamometer*.



Gambar 2.22 Skema penelitian dengan plat penghalang (Triyogi et al, 2017)

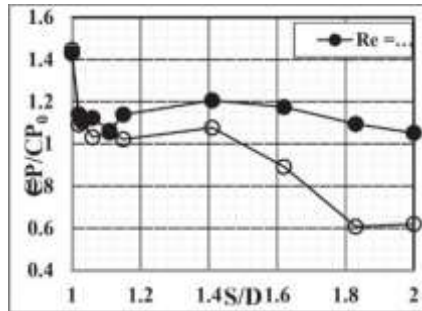
Didapatkan data hasil penelitian putaran dan *coefficient of power* seperti gambar 2.23 dan 2.24



Gambar 2.23 Grafik Perbandingan putaran (N/No) terhadap variasi panjang plat (S/D) untuk $Re = 30.000$ dan 90.000 (Triyogi et al, 2017)

Pada gambar 2.23 menunjukan hasil penelitian untuk nilai putaran dengan plat penghalang (N) berbanding dengan tanpa penghalang (No) terhadap rasio panjang plat dengan diameter sudu turbin (S/D) untuk variasi bilangan Reynolds sebesar 30.000 dan 90.000. Didapatkan bahwa pada $Re = 30.000$ untuk semua variasi panjang plat penghalang (S/D) memiliki nilai $N/No > 1$. Hal ini

menunjukkan peletakan plat penghalang pada $Re = 30.000$ didepan turbin selalu membuat putaran dari poros turbin berputar lebih



cepat dibandingkan dengan tanpa penghalang

Gambar 2.24 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* ($CoP/CoPo$) terhadap variasi panjang plat penghalang (S/D) untuk $Re = 30.000$ dan 90.000 (Triyogi et al, 2017)

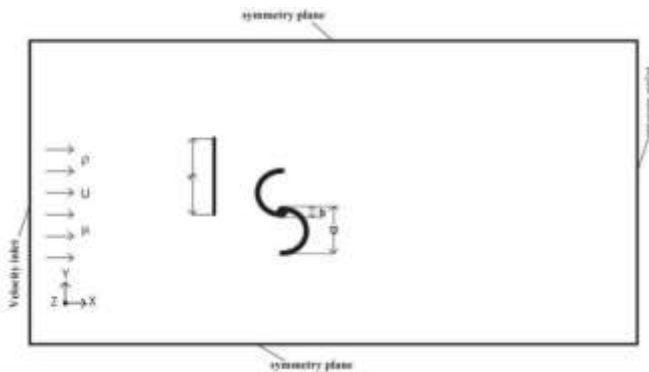
Pada gambar 2.24 didapatkan nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius dengan penghalang (CoP) dibandingkan dengan tanpa penghalang ($CoPo$) untuk $Re = 30.000$ lebih besar dari 1. Sedangkan untuk variasi $Re = 90.000$ tidak terjadi peningkatan nilai putaran maupun *coefficient of power* turbin angin Savonius pada semua variasi panjang plat (S/D). Pada variasi rasio $S/D < 1,41$ peletakan plat penghalang efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius namun pada variasi rasio $S/D > 1,41$ peletakan plat penghalang menurunkan nilai putaran dan *coefficient of power* turbin angin Savonius.

Didapatkan kesimpulan dari penelitian ini yaitu panjang plat penghalang dan variasi bilangan Reynolds mempengaruhi performa turbin angin Savonius. Peletakan plat penghalang didepan *returning blade* efektif meningkatkan performa turbin. Penelitian ini menunjukkan untuk variasi rasio panjang plat $S/D > 1.41$ di $Re = 90.000$ memiliki nilai *coefficient of power* yang lebih kecil dibandingkan dengan tanpa plat penghalang. Dimana pada kondisi ini nilai *coefficient of power* turun hingga 60,7%

dibandingkan dengan tanpa penghalang untuk $Re = 90.000$ dan $S/D = 1,82$.

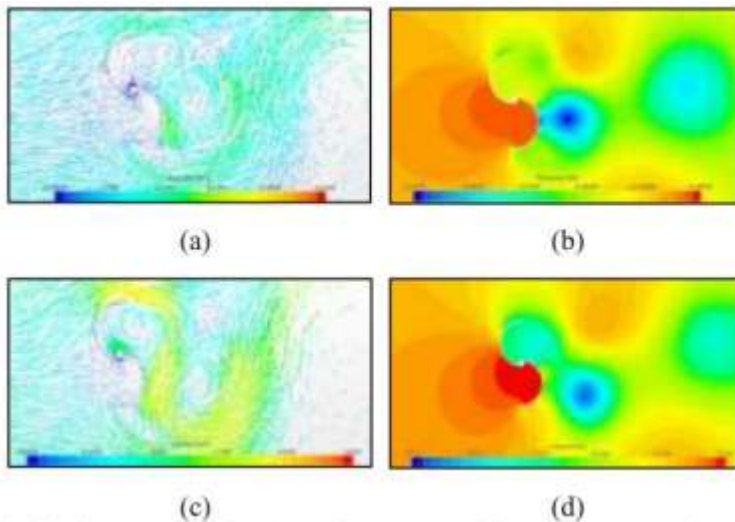
2.10.6. Studi Numerik Peningkatan Peforma dari Turbin Savonius dengan Plat Datar Penghalang

Penelitian menggunakan plat datar juga dilakukan oleh **Triyogi et al (2017)** dengan memvariasikan rasio panjang plat S/D menggunakan metode numerik sebesar 1,00; 1,02; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83 dan 2,00. Penelitian dilakukan menggunakan software STAR CCM++ untuk kondisi aliran *uniform* pada Re sebesar 30.000 dan 90.000 dengan skema penelitian yang ditunjukkan pada gambar 2.25. Penelitian menggunakan $k-\epsilon$ realizable sebagai model turbulen untuk memvisualisasikan fenomena aliran yang terjadi disekitar turbin. Untuk $Re = 30.000$ kecepatan aliran udara pada inlet adalah $U = 2,48$ m/s sedangkan untuk $Re = 90.000$ kecepatan aliran udaranya adalah $U = 7,45$ m/s.



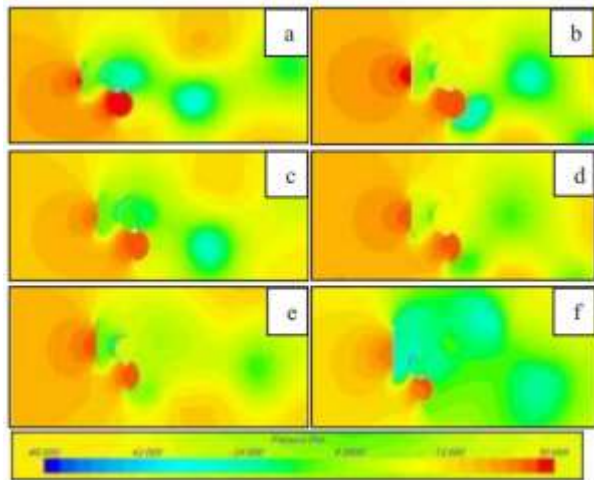
Gambar 2.25 Skema Penelitian (**Triyogi et al,2017**)

Didapatkan hasil simulasi numerik vektor kecepatan, kontur tekanan seperti pada gambar 2.26, 2.27, dan 2.28.

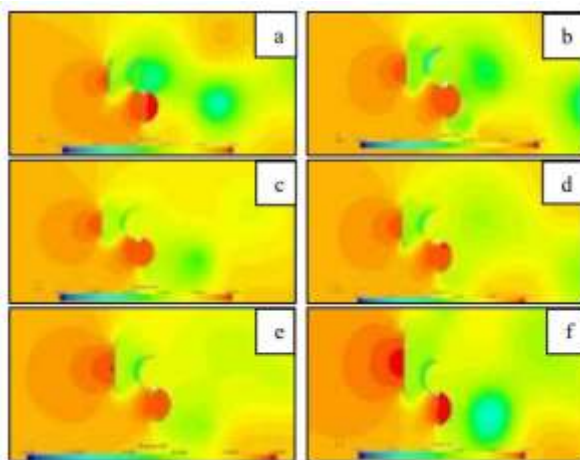


Gambar 2.26 Hasil simulasi vektor kecepatan untuk $Re = 30.000$ (a) dan 90.000 (c). Hasil simulasi kontur tekanan untuk $Re = 30.000$ (b) dan 90.000 (d) (Triyogi et al,2017)

Gambar 2.26 menunjukkan hasil simulasi aliran disekitar turbin angin Savonius tanpa plat penghalang untuk $Re = 30.000$ dan 90.000 . Dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan kecepatan pada bagian *returning blade* dan *advancing blade* dimana *advancing blade* memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Pada kontur tekanan terlihat bahwa *advancing blade* memiliki tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *returning blade*. Hal ini membuktikan bahwa penambahan plat penghalang pada $Re = 30000$ dan 90000 didepan turbin angin Savonius mampu meningkatkan putaran dan *coefficient of power*.



Gambar 2.27 Hasil simulasi kontur tekanan untuk $Re = 30.000$
 (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e).
 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Triyogi et al,2017)

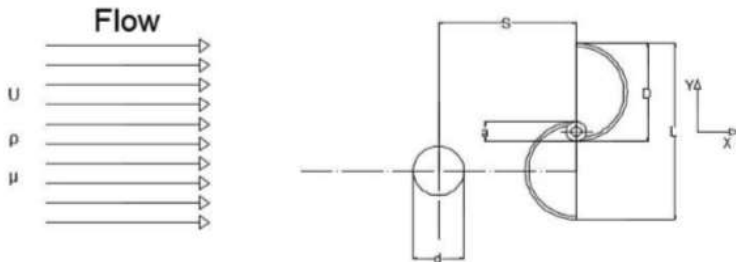


Gambar 2.28 Hasil simulasi kontur tekanan untuk $Re = 90.000$
 (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e).
 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Triyogi et al,2017)

Pada gambar 2.27 menunjukkan hasil simulasi aliran disekitar turbin Savonius dengan variasi plat penghalang untuk $Re = 30.000$. Diketahui bahwa peletakan silinder penghalang didepan *returning blade* turbin angin Savonius mempengaruhi tekanan didepan *returning blade*. Hal ini menyebabkan *pressure drag* yang bekerja pada *returning blade* menurun. Sehingga peletakan plat penghalang didepan *returning blade* dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.28 didapatkan hasil penelitian untuk $Re = 90.000$ pada variasi rasio panjang plat S/D . Terlihat bahwa pada $S/D = 2$ plat penghalang yang diletakan didepan *returning blade* mengurangi performa urbin. Hal ini diakibatkan area dengan tekanan yang lebih rendah didepan *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan $S/D < 2$.

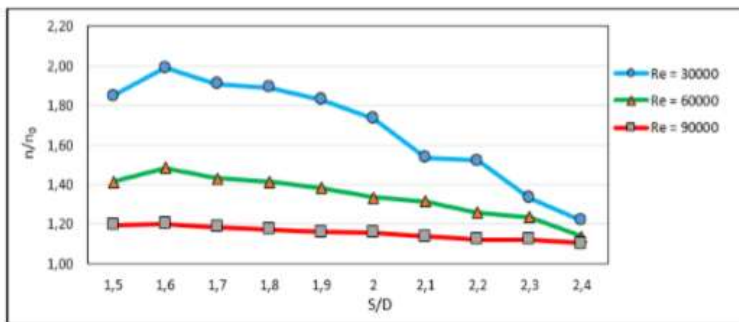
2.10.7. Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning Blade terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh **Nawazir, Ielman Wahid (2017)** dengan metode eksperimen yang dilakukan pada kondisi udara terbuka dengan angin dari *blower* yang diseragamkan dan beda uji berupa turbin angin Savonius dengan diameter turbin 190,2 mm, diameter sudu (D) 101,6 mm, tinggi (H) 300 mm, dan diameter overlap (a) 13 mm. Untuk dimensi penghalang berupa silinder sirkular dengan diameter (d) 101,6 mm dan tinggi 500 mm. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi jarak S/D antara 1,5 – 2,4 dan nilai bilangan Reynolds sebesar 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.22

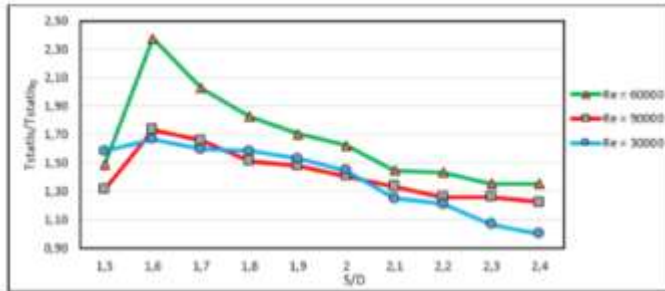


Gambar 2.29 Skema Instalasi Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Sirkular (Nawazir, Ielman. 2017)

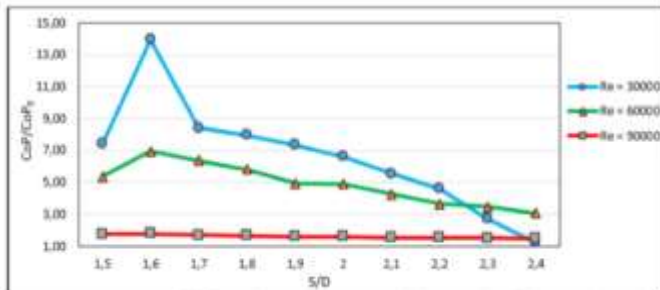
Dari peneletian ini didapatkan data berupa pengaruh putaran, torsi statis, dan *coefficient of power* yang dihasilkan turbin angin Savonius tiap variasi bilangan Reynolds terhadap sudut bukaan plat penghalang seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.23, gambar 2.24, dan gambar 2.25



Gambar 2.30 Grafik Fungsi n/n_0 terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)



Gambar 2.31 Grafik Fungsi $T_{statis}/T_{statis0}$ terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)



Gambar 2.32 Grafik Fungsi CoP/CoP_0 terhadap Variasi Besar S/D pada $Re = 3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (Nawazir, Ielman. 2017)

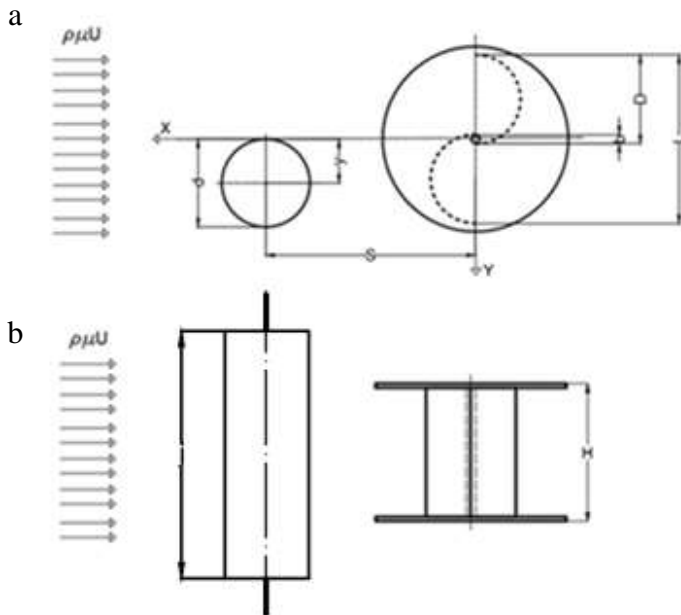
Hasil yang didapatkan dari studi eksperimen ini menunjukkan bahwa penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Peningkatan optimal terjadi pada S/D sebesar 1,6. Nilai coefficient of power yang paling besar diperoleh pada $S/D = 1,6$ untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ sebesar 25,05%. Nilai maksimum coefficient of power diperoleh pada nilai tip speed ratio sebesar 0,95. Sementara kecepatan putaran dari turbin angin Savonius yang diperoleh pada $S/D = 1,6$ untuk $Re = 6,0 \times 10^4$ memiliki nilai sebesar 472,63 rpm dengan torsi statis yang diperoleh sebesar 8,8 N-cm

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Analisa Dimensi

Pada penelitian ini diperlukan analisa dimensi untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap hasil penelitian. Parameter-parameter yang dimaksud adalah densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan fluida (U), diameter sudu turbin angin Savonius (D), tinggi turbin angin Savonius (H), diameter *shaft* (b), diameter silinder penghalang (d), tinggi silinder penghalang (t), posisi silinder penghalang (y), dan proyeksi dari silinder terhadap *returning blade* (S). Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Skema Penelitian, a. Tampak Atas ; b. Tampak Samping

Berdasarkan skema penelitian yang ditunjukkan oleh gambar 3.1, diperkirakan bahwa nilai *coefficient of power* akan bergantung pada:

- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- H : tinggi turbin Savonius (m)
- b : diameter *shaft* (m)
- d : diameter silinder penghalang (m)
- t : tinggi silinder penghalang (m)
- y : posisi silinder penghalang (m)
- S : lebar proyeksi silinder penghalang terhadap *returning blade* (m)

3.1.1. Analisa Dimensi *Coefficient of Moment*

Dalam melakukan analisa, perlu dilakukan langkah-langkah yang sesuai dengan *Buckingham-Pi Theorem*. Langkah yang dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi torsi dinamis

$$\tau = f(\rho, \mu, U, D, H, b, d, S, y, \omega)$$

Jumlah parameter (n) = 10 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

τ	: torsi dinamis, N.m
ρ	: massa jenis udara, kg/m^3
μ	: viskositas absolut udara, N.s/m^2
U	: kecepatan aliran udara, m/s
D	: diameter turbin Savonius, m
H	: tinggi turbin Savonius, m
b	: diameter <i>shaft</i> , m
d	: diameter silinder penghalang, m
S	: proyeksi lebar plat pada turbin Savonius, m
y	: posisi silinder penghalang, m
ω	: putaran turbin, rad/s

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam analisa. Dalam penelitian ini dipilih M, L, t
3. Membuat dimensi primer dari masing-masing parameter yang dipilih, seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Dimensi Primer Tiap Parameter Cm

Parameter	τ	ρ	μ	U	D	H	b	d	S	y	ω
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Menentukan parameter berulang (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu: ρ , U, D
Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 10-3 = 7 grup tanpa dimensi.

$$\pi_1 = \rho^a U^b D^c \tau$$

$$\pi_1 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{t^2}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

Dimana nilai a,b,c didapatkan dengan cara:

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

maka didapatkan nilai,

$$a = -1 ; b = -2 ; c = -3$$

sehingga didapatkan grup tak berdimensi satu (π_1) sebagai berikut:

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-2} D^{-3} \tau = \frac{\tau}{\rho U^2 D^3}$$

Cara yang sama dilakukan untuk mendapatkan grup tanpa dimensi yang lain, dan diperoleh:

$$\pi_1 = \frac{\tau}{\rho U^2 D^3}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{y}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{\omega D}{U}$$

Dari analisa dimensi di atas diperoleh grup tidak berdimensi sebagai berikut:

π_1 : *Coefficient of Moment*

π_2 : bilangan Reynolds

π_3 : rasio diameter silinder penghalang dengan diameter turbin Savonius

π_4 : rasio lebar proyeksi silinder penghalang pada *returning blade* dengan diameter turbin Savonius

π_5 : rasio posisi silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius

π_6 : rasio tinggi turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius

π_7 : *tip speed ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

$$\frac{\tau}{\rho U^2 D^3} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Dalam penelitian ini, $\frac{d}{D}$, $\frac{S}{D}$ dan $\frac{H}{D}$ merupakan variabel tetap.

Sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}$, $\frac{y}{D}$ dan $\frac{\omega D}{U}$ merupakan variabel yang divariasikan untuk diketahui pengaruhnya terhadap hasil *coefficient of moment* turbin angin Savonius, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\tau}{\rho U^2 D^3} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

4. Menentukan parameter berulang (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu: ρ , U, D

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $n - m = 10 - 3 = 7$ grup tanpa dimensi.

$$\pi_1 = \rho^a U^b D^c P$$

$$\pi_1 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

Dimana nilai a,b,c didapatkan dengan cara:

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

maka didapatkan nilai,

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga didapatkan grup tak berdimensi satu (π_1) sebagai berikut:

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

Cara yang sama dilakukan untuk mendapatkan grup tanpa dimensi yang lain, dan diperoleh:

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{y}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{\omega D}{U}$$

Dari analisa dimensi di atas diperoleh grup tidak berdimensi sebagai berikut:

- π_1 : *Coefficient of Power*
 π_2 : bilangan Reynolds
 π_3 : rasio diameter silinder penghalang dengan diameter turbin Savonius
 π_4 : rasio lebar proyeksi silinder penghalang pada *returning blade* dengan diameter turbin Savonius
 π_5 : rasio posisi silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
 π_6 : rasio tinggi turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius
 π_7 : *tip speed ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Dalam penelitian ini, $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}$ dan $\frac{H}{D}$ merupakan variabel tetap. Sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}$ dan $\frac{\omega D}{U}$ merupakan variabel yang divariasikan untuk diketahui pengaruhnya terhadap hasil *coefficient of power* turbin angin Savonius, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

$$CoP = f_3 \left(Re, \frac{y}{D}, TSR \right)$$

3.2 Peralatan

Dalam melakukan penelitian ini, dibutuhkan peralatan untuk menunjang pengambilan data eksperimen, antara lain:

3.2.1. Axial Fan

Pada penelitian ini digunakan *Axial Fan* untuk menghasilkan kecepatan angin yang dapat memutar sudu turbin Savonius. *Axial Fan* yang digunakan adalah **CKE SPV-18** seperti pada gambar 3.2. *Axial Fan* diletakkan sejauh 2900 mm di depan turbin angin Savonius seperti pada gambar 3.7. Spesifikasi *Axial Fan* ditunjukkan pada tabel 3.3



Gambar 3.2 Axial Fan CKE SPV-18

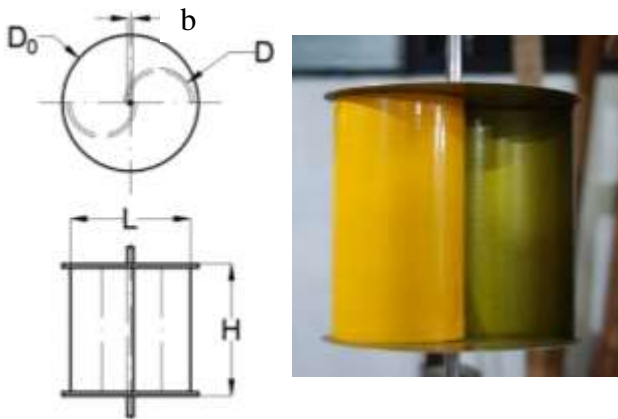
Tabel 3.3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18

Spesifikasi	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 rpm
Power	1,7 kWatt
Air Flow	4413 CFM
Phase	1
Voltage	220 - 240 V
Static Pressure	520 Pa

3.2.2. Turbin Angin Savonius

Skema turbin angin Savonius yang ditunjukkan pada gambar 3.3 memiliki dimensi sebagai berikut:

- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tinggi (H) : 294,4 mm
- Diameter *shaft* (b) : 19 mm
- Diameter turbin (L) : 303,4 mm
- Diameter *end plate* (Do) : 333,74 mm
- Tebal *end plate* : 1,3 mm
- Material poros : *Stainless Steel*
- Material *end plate* : *Alumunium Cladding 2024*

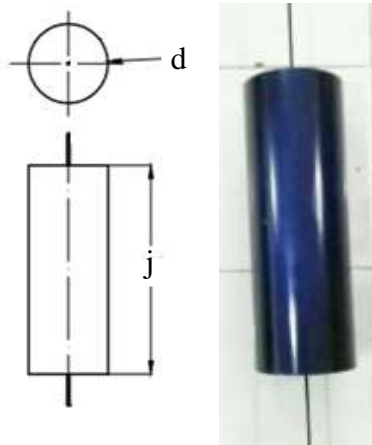


Gambar 3.3 Turbin Angin Savonius

3.2.3. Silinder Penghalang

Skema silinder penghalang yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.4 dengan spesifikasi sebagai berikut:

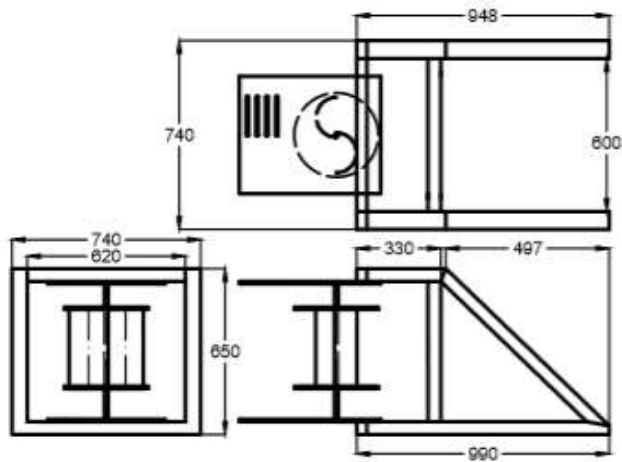
- Diameter silinder (d) : 165,2 mm
- Tinggi (j) : 500 mm
- Material Silinder Pengganggu : *PVC (Poly Vinyl Chloride)*



Gambar 3.4 Silinder Penghalang

3.2.4. Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius dan silinder penghalang diletakkan pada suatu penyangga seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5

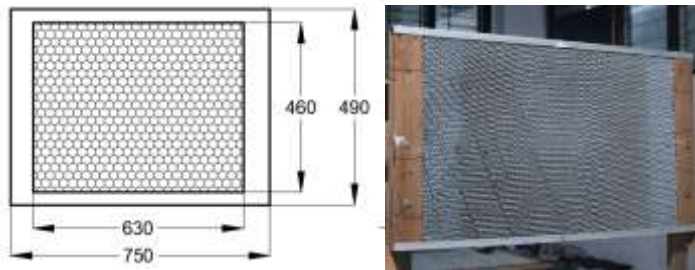


Gambar 3.5 Penyangga Turbin Angin Savonius

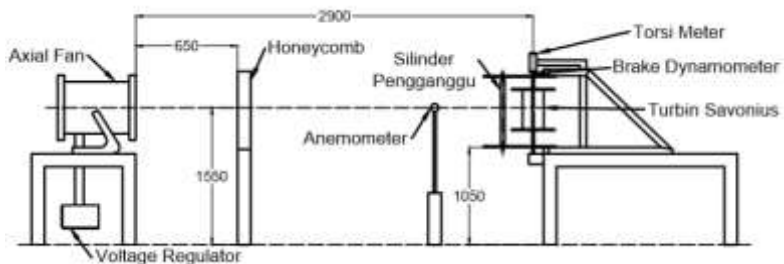
3.2.5. Honeycomb

Pada penelitian ini, *honeycomb* digunakan untuk menyeragamkan aliran angin menuju turbin angin Savonius dan mencegah terjadinya *swirl*. *Honeycomb* yang digunakan berbentuk persegi dengan sket seperti gambar 3.6. *Honeycomb* diletakkan di antara *Axial Fan* dengan turbin angin Savonius seperti pada gambar 3.7 dan mempunyai dimensi sebagai berikut:

- Panjang sisi *frame* : 508 mm
- Panjang sisi *honeycomb* : 468 mm
- Tebal *frame* : 50 mm
- Tebal *honeycomb* : 20 mm
- Meshing size : 16 lubang/inch²



Gambar 3.6 Honeycomb



Gambar 3.7 Skema Instalasi Axial Fan, Honeycomb, Inverter, Silinder Penghalang dan Turbin Angin Savonius

3.2.6. Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan alat ukur untuk mengukur nilai putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini yaitu,

a. Voltage Regulator

Voltage Regulator adalah alat yang berfungsi untuk menyediakan suatu tegangan keluaran DC stabil dan tidak dipengaruhi oleh perubahan tegangan masukan, arus beban keluaran, dan suhu. *Voltage Regulator* yang digunakan pada penelitian ini **Voltage Regulator Model TDGC 2J-3** seperti pada gambar 3.8. Spesifikasi Voltage Regulator ditunjukkan pada tabel 3.4



Gambar 3.8 Voltage Regulator Model TDGC 2J-3

Tabel 3.4 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC 2J-3

Spesifikasi	
Input	110/220 V
Output	0 – 250 V
Frekuensi	50 – 60 Hz
Arus Maksimal	4,8/12 A
Kapasitas	3 KVA

b. Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah benda yang berputar. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12** seperti pada gambar 3.9. Spesifikasi tachometer ditunjukkan pada tabel 3.5.



Gambar 3.9 Tachometer OMEGA HHT12

Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12

Spesifikasi	
<i>Range</i>	5 sampai 99.999 rpm
Akurasi	0,01% atau ± 1 digit
Resolusi	0,001 sampai 1 rpm
Daya	2 “AA” 1,5 V DC Batteries
<i>Display</i>	5-digit alphanumeric LCD
Memori	Max, min, dan last
<i>Enviromental</i>	5° sampai 40° C

c. Anemometer

Anemometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan pada penelitian ini adalah anemometer model **Omega HHF141** seperti pada gambar 3.10. Spesifikasi dari anemometer ini ditunjukkan pada tabel 3.6



Gambar 3.10 Anemometer OMEGA HHF141

Tabel 3.6 Spesifikasi Anemometer OMEGA HHF141

Spesifikasi		
<i>Range</i>	25 mm probe	300 – 6800 FPM
	70 mm probe	400 – 7800 FPM
Akurasi	$\pm 1\%$ atau ± 1 digit	
Resolusi	1 ft/min atau 0,01 m/sec	
<i>Power Supply</i>	3 AA alkaline batteries	
Output	USB atau 0 – 5V DC Analog Signal	
<i>Operating Temperatur</i>	Probe	-20° – 100°C
	Instrumen	0° – 50°C

d. Torque meter statis

Torque meter statis adalah alat yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu benda. Torque meter statis yang digunakan pada penelitian ini adalah **Torque Meter LUTRON TQ-8800**

seperti pada gambar 3.11. Spesifikasi torque meter ini ditunjukkan pada tabel 3.7



Gambar 3.11 Torque meter Statis LUTRON TQ-8800

Tabel 3.7 Spesifikasi Torque meter Statis LUTRON TQ-8800

Spesifikasi	
<i>Max. Range</i>	15 kg.cm
<i>Resolusi Tinggi</i>	0,01 kg.cm
<i>Resolusi Rendah</i>	0,1 kg.cm
<i>Over Load Protection Range</i>	22,5 kgf.cm

e. Multimeter

Multimeter adalah alat ukur yang dipakai untuk mengukur tegangan listrik yang keluar dari dari voltage regulator. Multimeter yang digunakan adalah **CODY DT-9205A** seperti pada gambar 3.12. Spesifikasi multimeter ini ditunjukkan pada tabel 3.8



Gambar 3.12 Multimeter CODY DT-9205A

Tabel 3.8 Spesifikasi Multimeter CODY DT-9205A

Spesifikasi	
<i>Measurment Type</i>	ACV
<i>Range</i>	200 mV – 750 V
<i>Best Accuracy</i>	$\pm (0,8\% + 2)$
<i>Resolusi</i>	0,01 mV
<i>Input Impedance</i>	10 M Ω
<i>Frequency Range</i>	40 – 400 Hz

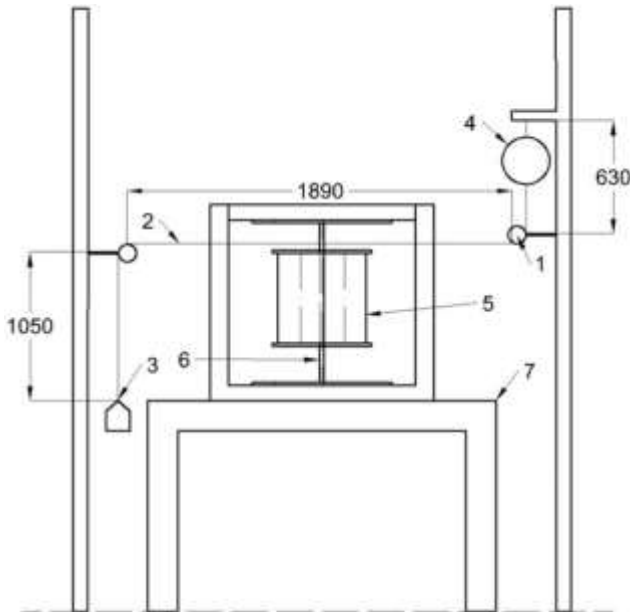
f. *Brake dynamometer*

Brake dynamometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius. Skema *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2012)** ditunjukkan pada gambar 3.13

Keterangan Gambar 3.13

1. Sistem *pulley*
2. Benang nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

Pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius dengan *brake dynamometer* dilakukan dengan cara menambahkan massa pemberat yang disambungkan dengan neraca pegas secara bertahap saat turbin sedang berputar hingga turbin berhenti berputar. Setiap menambahkan massa pemberat, putaran dari turbin diukur dengan menggunakan tachometer. Nilai torsi dinamis akan digunakan untuk menghitung daya output turbin dengan cara mengalikan torsi dinamis saat diberikan massa pemberat dengan jumlah tertentu dengan putaran turbin yang dihasilkan pada kondisi yang sama. Alat pendukung ditunjukkan pada gambar 3.14, 3.15 dan 3.16



Gambar 3.13 Skema *brake dynamometer*

1. Benang nilon

Benang nilon yang digunakan adalah benang nilon **OPTIMUM LAZER** seperti pada gambar 3.14. Spesifikasi anak timbangan ini ditunjukkan pada tabel 3.9



Gambar 3.14 Benang Nilon LAZER

Tabel 3.9 Spesifikasi Benang Nilon LAZER

Spesifikasi	
Max. Weight	20 kg
Diameter	0,6 mm

2. Massa Pemberat

Massa pemberat yang digunakan adalah anak timbangan **OIML R 111** dengan variasi massa 1g, 2g, 5g, 10g, 20g, 50g, 100g, 200g, dan 500g dan kawat dengan variasi massa 5g, 10g, dan 20g seperti pada gambar 3.15. Spesifikasi anak timbangan ini ditunjukkan pada tabel 3.10



Gambar 3.15 Massa Pemberat

Tabel 3.10 Spesifikasi Massa Pemberat

Spesifikasi	
Massa	Toleransi (+/- dalam mg)
1g	1
2g	1,2
5g	1,5
10g	2
20g	2,5
50g	3
100g	5
200g	10
500g	25

3. Neraca Pegas

Neraca pegas adalah alat ukur yang dipakai untuk mengukur beban yang terbaca setelah penambahan massa pemberat. Neraca pegas yang digunakan adalah neraca pegas **NAGATA** seperti pada gambar 3.16. Spesifikasi neraca pegas ditunjukkan pada tabel 3.11



Gambar 3.16 Neraca Pegas NAGATA

Tabel 3.11 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA

Spesifikasi	
Kapasitas	10kg
Resolusi	50g

g. Bearing

Bearing yang digunakan adalah **IBC GERMANY 6201THBP630955P**

h. Pelumas

Untuk mengurangi efek gesekan akibat kotoran yang berada pada *bearing* yang digunakan pada turbin angin maka digunakan pelumas serbaguna berupa *spray lubricant* untuk menghilangkan kotoran. Penggunaan pelumas ini digunakan sebelum alat uji digunakan setiap pengambilan data dan perubahan variasi. Pelumas yang digunakan dalam penelitian ini ada **WD-40 Multi-Use Product**.

3.3 Prosedur Penelitian

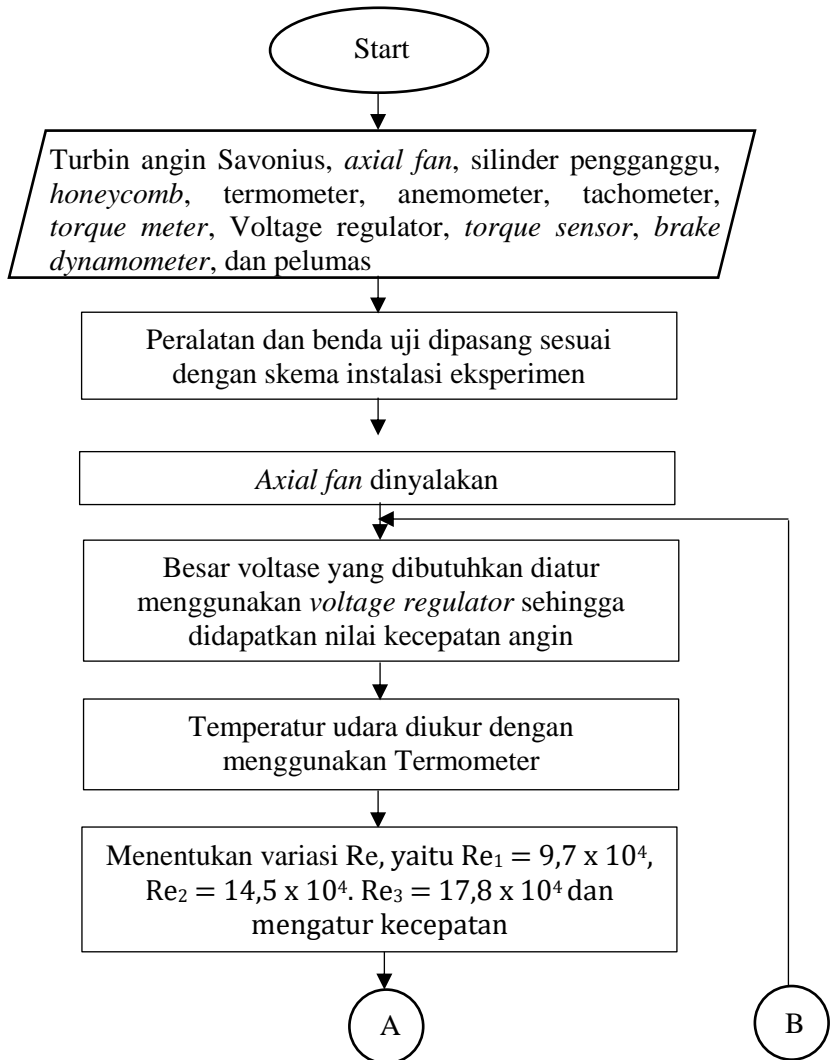
Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

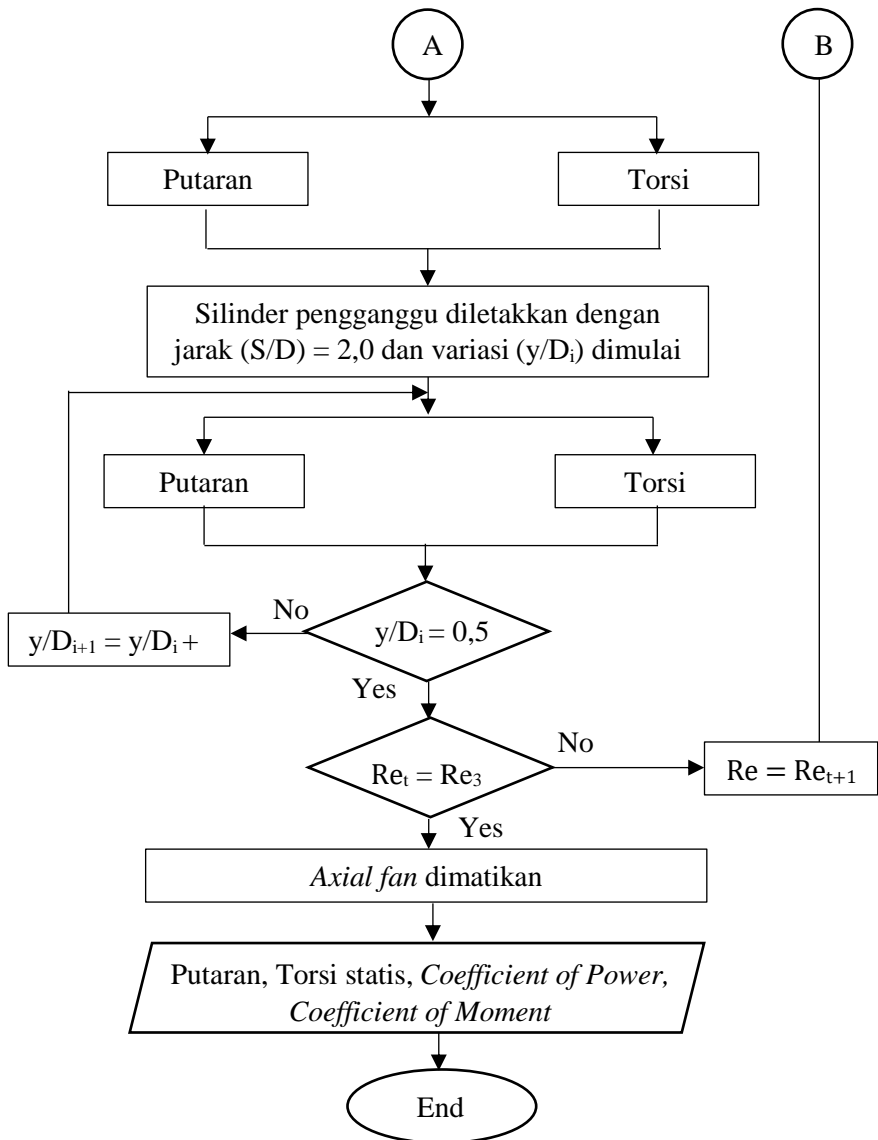
1. Perencanaan peralatan yang akan digunakan.
2. Pemasangan benda uji di depan *axial fan*.
3. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin sesuai dengan yang diharapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur menggunakan termometer.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer sesuai dengan yang diinginkan yaitu $Reynolds Number = 9,7 \times 10^4$
6. Melakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan tachometer.
7. Mengukur torsi dinamis dengan menggunakan *brake dynamometer* dengan langkah sebagai berikut:
 - i. Memberikan massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan
 - ii. Mengukur massa yang terbaca pada neraca pegas
 - iii. Mengukur putaran turbin angin Savonius dengan tachometer
 - iv. Mengulangi langkah i-iii hingga turbin berhenti berputar
 - v. Memilih nilai CoP tertinggi yang dihasilkan dari perkalian antara torsi dinamis dengan putaran turbin dengan kondisi beban yang sama
8. Melakukan pengukuran torsi statis dengan *torquemeter*
9. Mematikan *axial fan*
10. Mengulangi langkah 3 sampai 9 dengan merubah kecepatan angin dengan $Reynolds Number = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$.

11. Memasang silinder sirkular pengganggu di depan *returning blade* dengan jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan silinder sirkular pengganggu (S/D) sebesar 2 dengan rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin angina Savonius (y/D) sebesar 0.
12. Mematikan *axial fan*
13. Mengulangi langkah 3 sampai 12 dengan memvariasikan y/D sebesar 0,25; 0,5
14. Mematikan *axial fan*
15. Memasang *torquemeter* dibagian atas poros turbin angin Savonius
16. Memasang silinder sirkular pengganggu di depan *returning blade* dengan jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan silinder sirkular pengganggu (S/D) sebesar 2 dengan rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin angina Savonius (y/D) sebesar 0,5. Mematikan *axial fan*
17. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran, torsi statis, dan torsi dinamis) menjadi *Coefficient of Power* dan melakukan plotting grafik torsi statis berpenghalang sebagai fungsi sudut (θ), grafik kecepatan putar berpenghalang sebagai fungsi Reynolds Number (Re), grafik *coefficient of power* terhadap fungsi *tip speed ratio* (TSR), grafik *coefficient of moment* sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR)

Flowchart Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dijelaskan dalam flowchart yang ditunjukkan pada gambar 3.19





Gambar 3.17 Flowchart Penelitian Turbin Savonius

3.4 Alokasi Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.14

Tabel 3.12 Waktu Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Nop '17	Des '17	Jan '18	Feb '18	Mar '18	Apr '18	Mei '18	Jun '18	Jul '18
1	Pembuatan Alat									
2	Penulisan Proposal									
3	Ujian Proposal									
4	Setting Alat									
5	Pengukuran									
6	Analisa Data & Penulisan TA									
7	Ujian TA									

3.5 Hasil Penelitian

Hasil yang akan dicapai pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Grafik putaran sebagai fungsi Reynolds Number (Re)
2. Grafik *Coefficient of Power* sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR)
3. Grafik *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR)
4. Grafik torsi statis sebagai fungsi sudut (θ)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Contoh Perhitungan

4.1.1. Perhitungan Reynolds Number

- **Massa jenis udara (ρ)**

Perhitungan massa jenis udara pada saat penelitian dapat menggunakan persamaan Boyle-Gay Lussac mengenai pemuaian gas, yaitu:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

Pada persamaan 4.1, $V = \frac{m}{\rho}$ sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{P_1 \cdot m_1}{T_1 \cdot \rho_1} = \frac{P_2 \cdot m_2}{T_2 \cdot \rho_2} \quad (4.2)$$

dimana:

P_1 : tekanan absolut udara pada keadaan standar yaitu 1 atm
= 101325 Pa

P_2 : tekanan absolut udara pada saat pengukuran

m_1 : massa udara pada keadaan standar

m_2 : massa udara pada saat pengukuran

ρ_1 : massa jenis udara 1,225 kg/m³

ρ_2 : massa jenis udara

T_1 : temperatur udara standar 288,2 K

T_2 : temperatur pada saat penelitian yaitu 28,2°C = 301,2 K

Pada keadaan standar dan keadaan saat pengukuran berada di ketinggian yang sama, maka :

$$P_1 =$$

$$P_2$$

Massa udara pada keadaan standar dan keadaan saat pengukuran sama, maka :

$$m_1 =$$

$$m_2$$

Dari batasan diatas, maka persamaan 4.2 menjadi seperti berikut:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \cdot \rho_1}{T_2} \quad (4.3)$$

$$\rho_2 = \frac{288,2 \text{ K} \cdot 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{301,2 \text{ K}} = 1,1721 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Viskositas absolut udara (μ)**

Perhitungan viskositas absolut udara pada saat penelitian menggunakan persamaan Sutherland, yaitu:

$$\mu = \frac{b \cdot (T)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T}} \quad (4.4)$$

dimana :

b : $1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s.K}^{0,5}$

S : 110,4 K

T : temperatur pada saat penelitian yaitu $28,2^\circ\text{C} = 301,2 \text{ K}$

Didapatkan nilai viskositas absolut udara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{0,5}} \cdot (301,2 \text{ K})^{0,5}}{1 + \frac{110,4 \text{ K}}{301,2 \text{ K}}} \\ &= 1,852 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

- **Kecepatan *free stream* (U)**

Perhitungan kecepatan *free stream* pada saat pengukuran menggunakan persamaan seperti berikut:

$$U_\infty = \frac{Re \times \mu}{\rho \times L}$$

dimana :

ρ : massa jenis udara = $1,1721 \text{ kg/m}^3$

Re: Reynolds *Number* pada saat penelitian = $17,8 \times 10^4$

L : panjang karakteristik ($2D-b-2t$) = $0,3034 \text{ m}$

μ : viskositas absolut = $1,852 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$

sehingga nilai Reynolds number yaitu:

$$U_{\infty} = \frac{17,8 \times 10^4 \cdot 1,852 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{1,1721 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,3034 m} = 9,2 \frac{m}{s}$$

4.1.2. Perhitungan *Coefficient of Power*

Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP) pada penelitian ini didapatkan dari persamaan 2.14 sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} = \frac{\tau \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}}{\frac{1}{2} \rho U^3 (2D - b - 2t) \cdot H}$$

dimana :

H : tinggi turbin = 0,2944 m

Pada persamaan diatas, nilai torsi dinamis didapatkan menggunakan persamaan 2.10:

$$\tau = (|s - m|g) \times r$$

dimana :

s : massa yang terbaca pada pegas = 0,05 kg

m : massa beban = 0,015 kg

g : gravitasi = 9,81 m/s²

r : jari-jari silinder yang menerima beban = 0,0095 m

didapatkan nilai torsi dinamis sebagai berikut:

$$\tau = (|0,05 - 0,015| \cdot 9,81) \times 0,0095 = 0,0033 \text{ N.m}$$

Sehingga nilai CoP pada pengukuran Re = 17,8 x 10⁴ sebagai berikut:

$$CoP = \frac{0,0033 \text{ N.m} \cdot \frac{\pi \cdot 626,9 \text{ rpm}}{30}}{\frac{1}{2} 1,1721 \frac{kg}{m^3} \cdot (9,2 \text{ m})^3 \cdot 0,3034 m \cdot 0,2944 m} = 0,0055$$

4.1.3. Perhitungan *Tip Speed Ratio*

Perhitungan *Tip Speed Ratio* (λ) pada saat pengukuran menggunakan persamaan 2.12 sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega D}{U}$$

dimana besar ω dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4.5)$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 626,9 \text{ rpm}}{60} = 63,53 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Sehingga nilai TSR pada pengukuran $Re = 17,8 \times 10^4$ didapatkan :

$$\lambda = \frac{63,53 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,1652 \text{ m}}{9,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,14$$

4.1.4. Perhitungan *Coefficient of Moment*

Perhitungan *coefficient of moment* pada saat pengukuran menggunakan persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$Cm = \frac{\tau}{\rho U^2 D (2D - b - 2t) \cdot H}$$

dimana τ merupakan torsi dinamis, sehingga didapatkan nilai Cm sebagai berikut :

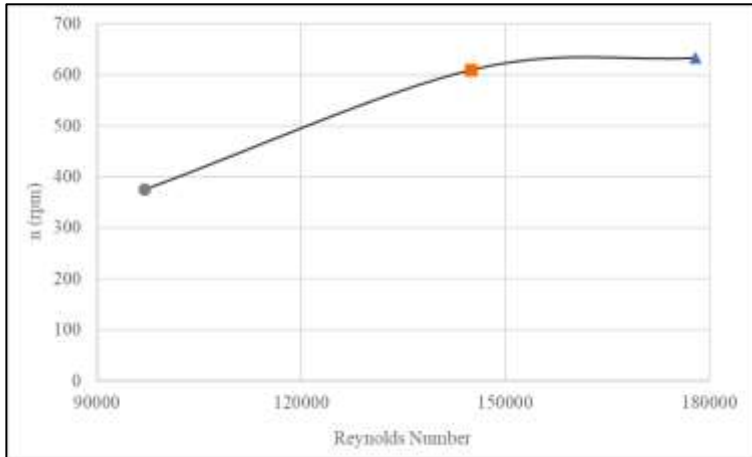
$$Cm = \frac{0,0033 \text{ N} \cdot \text{m}}{\frac{1}{2} \cdot 1,1721 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(9,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 165,2 \text{ m} \cdot 0,3034 \text{ m} \cdot 0,2944 \text{ m}}$$

$$= 0,00509$$

4.2. Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu terhadap Variasi Reynolds Number $9,3 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; dan $17,8 \times 10^4$

Nilai putaran terhadap variasi Reynolds Number diukur dari nilai putaran pada Reynolds Number sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Pengukuran dilakukan pada keadaan putaran turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Pengukuran ini dilakukan menggunakan alat ukur *tachometer digital*. Data pada

pengukuran ini dijadikan data standar pengukuran untuk mengetahui kondisi awal dari putaran turbin angin Savonius agar dapat dibandingkan dengan kondisi ketika menggunakan silinder pengganggu.

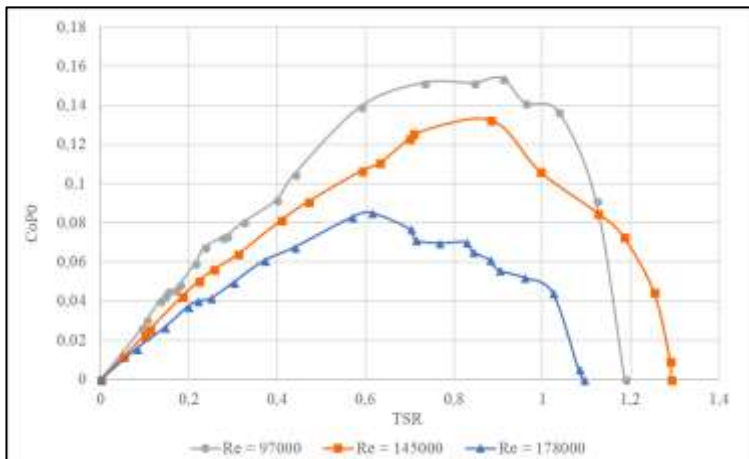


Gambar 4.1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (n_o) terhadap Reynolds Number

Pada gambar 4.1 data putaran pada kondisi standar yaitu pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ didapatkan putaran turbin sebesar 374,57 rpm, pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 609,2 rpm, dan pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran 632,86 rpm. Pengaruh kenaikan Reynolds Number menyebabkan putaran turbin angin Savonius meningkat. Hal ini disebabkan kecepatan udara *free stream* meningkat seiring dengan peningkatan Reynolds Number. Aliran udara yang semakin cepat berpengaruh terhadap nilai gaya *drag* pada turbin angin Savonius. Semakin besar kecepatan udara, maka gaya *drag* pada sisi *advancing* akan meningkat. Sehingga selisih gaya *drag* akan semakin meningkat.

4.3. Analisis *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu terhadap Variasi *Tip Speed Ratio*

Coefficient of Power terhadap variasi *Tip Speed Ratio* diukur dari nilai putaran pada Reynolds Number sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Pengukuran dilakukan pada keadaan turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Analisa *Coefficient of Power* dilakukan dengan membandingkan daya yang dihasilkan turbin dengan daya awal yang dibutuhkan oleh turbin. Daya yang dihasilkan turbin dianalisa dengan menghitung torsi dinamis yang diukur menggunakan *brake dynamometer* dan dikalikan dengan putaran turbin. Data pada pengukuran ini dijadikan data standar pengukuran untuk mengetahui kondisi awal dari *Coefficient of Power* turbin angin Savonius agar dapat dibandingkan dengan kondisi ketika menggunakan silinder pengganggu



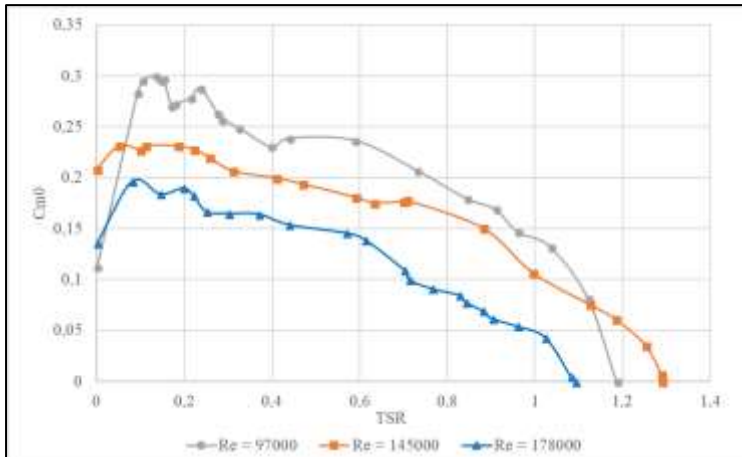
Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*

Pada gambar 4.2 diketahui bahwa nilai CoP_0 maksimum pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ berada pada TSR = 0,91 dengan nilai sebesar 0,154. Nilai CoP_0 maksimum pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ pada TSR = 0,88 dengan nilai 0,133. Kemudian nilai

CoP₀ maksimum bilangan Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$ pada TSR = 0,61 dengan nilai sebesar 0,085. Nilai CoP₀ terbesar pada Reynolds *Number* = $9,7 \times 10^4$ disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang menabrak turbin angin Savonius meningkat sehingga selisih gaya *drag* yang terjadi pada turbin angin Savonius juga meningkat. Peningkatan selisih gaya *drag* menyebabkan nilai CoP₀ ikut meningkat. Kemudian pada Reynolds *Number* = $14,5 \times 10^4$ terjadi penurunan nilai CoP₀ karena peningkatan putaran turbin angin Savonius tinggi tidak diikuti dengan peningkatan torsi dinamis yang tinggi. Hal ini menyebabkan daya yang dibutuhkan turbin lebih besar dibandingkan daya yang dihasilkan turbin sehingga CoP₀ yang dihasilkan akan menurun.

4.4. Analisis *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu terhadap Variasi *Tip Speed Ratio*

Coefficient of Moment terhadap variasi *Tip Speed Ratio* diukur dari nilai putaran pada Reynolds *Number* sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Pengukuran dilakukan pada keadaan turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Analisa *Coefficient of Moment* dilakukan dengan membandingkan torsi yang dihasilkan turbin dengan torsi awal yang dibutuhkan oleh turbin. Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dianalisa dengan torsi dinamis yang diukur menggunakan *brake dynamometer*. Data pada pengukuran ini dijadikan data standar pengukuran untuk mengetahui kondisi awal dari *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius agar dapat dibandingkan dengan kondisi ketika menggunakan silinder pengganggu

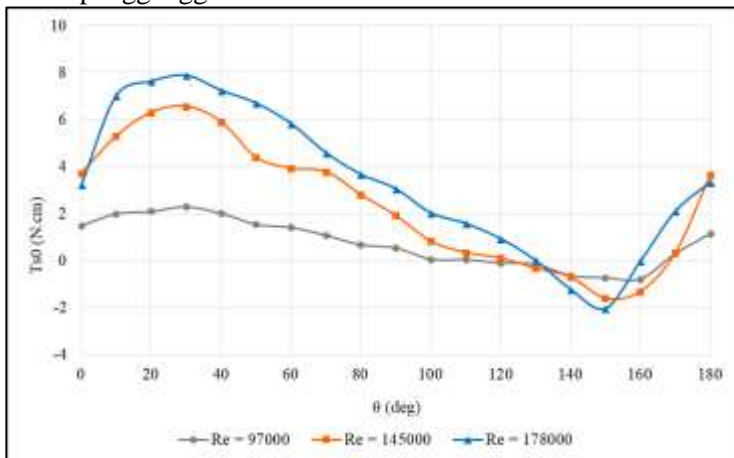


Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (C_{m0}) terhadap *Tip Speed Ratio*

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa nilai C_{m0} maksimum pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ berada pada TSR = 0,134 dengan nilai sebesar 0,30. Kemudian nilai C_{m0} maksimum pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ pada TSR = 0,05 dengan nilai 0,232 dan nilai C_{m0} maksimum bilangan Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ berada pada TSR = 0,08 dengan nilai sebesar 0,197. Dari gambar diketahui bahwa urutan nilai C_{m0} maksimum berada pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$, Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$, dan Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$. Nilai C_{m0} yang tertinggi pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$. Hal ini disebabkan oleh karena kecepatan aliran udara yang menabrak turbin angin Savonius meningkat sehingga selisih gaya *drag* yang terjadi pada turbin angin Savonius juga meningkat. Peningkatan selisih gaya *drag* menyebabkan peningkatan torsi dinamis sehingga nilai C_{m0} ikut meningkat.

4.5. Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu terhadap Variasi Sudut

Torsi statis terhadap variasi sudut diukur dari nilai torsi statis pada Reynolds Number sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Pengukuran dilakukan pada keadaan turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Pengukuran ini dilakukan saat turbin angin Savonius berada pada posisi 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° yang diukur menggunakan *torquemeter*. Data pada pengukuran ini dijadikan data standar pengukuran untuk mengetahui kondisi awal dari torsi statis turbin angin Savonius agar dapat dibandingkan dengan kondisi ketika menggunakan silinder pengganggu



Gambar 4.4 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (T_{s0}) terhadap Sudut

Pada gambar 4.4 dapat diketahui bahwa pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ torsi statis maksimum terjadi pada sudut 30° sebesar 2,3 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 160° sebesar -0,78 N.cm. Pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ torsi statis maksimum terjadi pada sudut 30° sebesar 6,56 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 150° sebesar -01,61 N.cm.. Pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ torsi statis tertinggi terjadi pada sudut 30° sebesar 7,88 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 150° sebesar -2,03 N.cm. data perbandingan

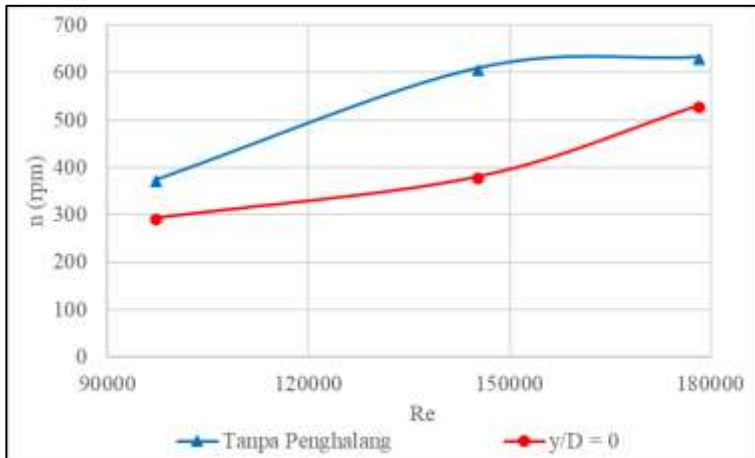
grafik diatas memiliki bukaan sudut turbin tertinggi cenderung sama yaitu pada sudut 30° dan bukaan sudut turbin terendah yang cenderung sama yaitu pada sudut 150° dan 160° .

Terlihat pada grafik torsi statis pada sudut 30° bernilai positif. Peningkatan nilai torsi statis diakibatkan oleh meningkatnya Reynolds *Number* yang berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran udara. Peningkatan kecepatan aliran udara yang melewati turbin angin Savonius menyebabkan selisih gaya *drag* pada *blade* turbin angin meningkat. Semakin besar nilai selisih gaya *drag* diantara kedua *blade* akan menyebabkan nilai torsi statis turbin angin meningkat. Luas penampang *advancing blade* yang dialiri udara juga berpengaruh terhadap selisih gaya *drag*. Selain itu arah gaya *drag* yang searah putaran turbin ikut mengakibatkan nilai torsi statis maksimum. Pada torsi maksimum, *self starting* pada turbin angin sangat baik. Pada nilai torsi statis pada sudut 150° dan 160° bernilai negatif. Hal ini dapat terjadi karena arah gaya *drag* berlawanan dengan arah putaran turbin angin Savonius dan luas penampang *returning blade* yang dialiri udara lebih besar dibandingkan dengan luas penampang *advancing blade*. torsi statis yang bernilai negatif mengakibatkan turbin angin Savonius pada sudut ini tidak memiliki kemampuan *self starting*.

4.6. Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkular terhadap Reynolds *Number* dengan Variasi y/D

Pengukuran putaran turbin angin Savonius dilakukan dengan penambahan silinder sirkular didepan *returning blade*. Silinder pengganggu memiliki rasio $d/D = 1$ dengan variasi *Tip Speed Ratio* $= 0 \leq TSR \leq 1,5$ dan variasi rasio posisi silinder $y/D = 0; 0,25; 0,5$. Putaran turbin diukur menggunakan *tachometer* yang diarahkan pada bagian *shaft* turbin angin Savonius yang sudah dipasang *scotlight*. Analisa putaran turbin angin Savonius dilakukan dengan plot grafik putaran terhadap variasi *Tip Speed*

Ratio pada Reynolds *Number* yang sama seperti yang terlihat pada gambar 4.5, 4.6, 4.7.



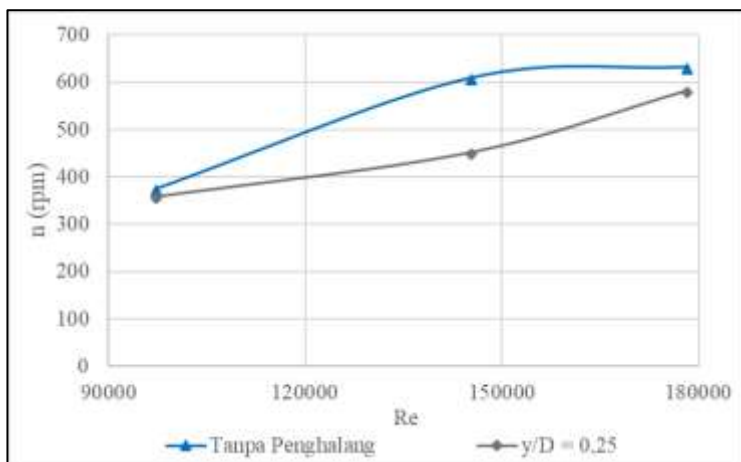
Gambar 4.5 Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds *Number* pada $y/D = 0$

Pada gambar 4.5 terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius dengan pengganggu $y/D = 0$ pada Reynolds *Number* = $9,7 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 294,29 rpm, Reynolds *Number* = $14,5 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 381,03 rpm, dan Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 530,37 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa putaran turbin pada $y/D = 0$ meningkat seiring dengan peningkatan Reynolds *Number*.

Putaran tertinggi turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu dengan $d/D = 1$ diharapkan terjadi pada setiap posisi penempatan silinder pengganggu. Penambahan silinder pengganggu pada posisi tertentu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* turbin angin Savonius sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat dan putaran turbin akan lebih cepat. Namun setelah dilakukan pengukuran, putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 1$ dan $y/D = 0$

mempunyai posisi optimal pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$. Meningkatnya nilai putaran turbin angin Savonius hingga Reynolds Number terbesar terjadi karena penempatan silinder penghalang di depan *returning blade* dapat menghalangi aliran angin menuju *returning blade* sehingga menyebabkan penurunan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Selain itu, pada posisi silinder pengganggu 0 dapat lebih mengarahkan aliran udara ke sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* yang diterima akan meningkat.

Apabila membandingkan putaran turbin angin Savonius tanpa pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D = 0$ di depan *returning blade*, terlihat bahwa untuk posisi silinder pengganggu $y/D = 0$ pada semua Reynolds Number tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius.



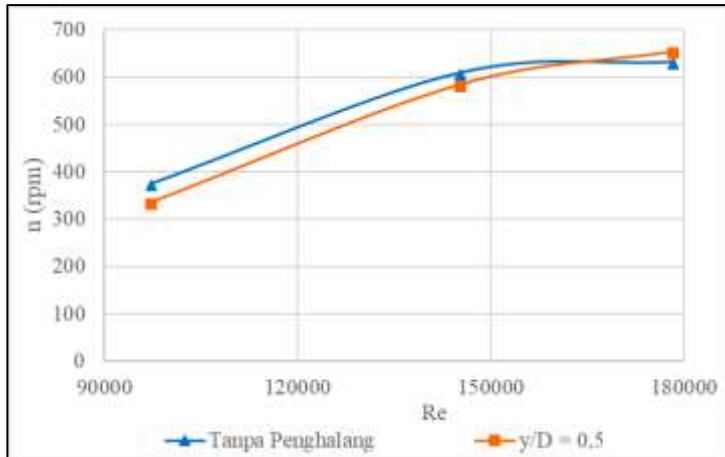
Gambar 4.6 Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds Number pada $y/D = 0,25$

Pada gambar 4.6 terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius dengan pengganggu $y/D = 0,25$ pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 358,55 rpm, Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 451,98 rpm,

dan Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 581,67 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa putaran turbin pada $y/D = 0,25$ meningkat seiring dengan peningkatan Reynolds *Number*.

Putaran tertinggi turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu dengan $d/D = 1$ diharapkan terjadi pada setiap posisi penempatan silinder pengganggu. Penambahan silinder pengganggu pada posisi tertentu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* turbin angin Savonius sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat dan putaran turbin akan lebih cepat. Namun setelah dilakukan pengukuran, putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 1$ dan $y/D = 0,25$ mempunyai posisi optimal pada Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$. Meningkatnya nilai putaran turbin angin Savonius hingga Reynolds *Number* terbesar terjadi karena penempatan silinder penghalang di depan *returning blade* dapat menghalangi aliran angin menuju *returning blade* sehingga menyebabkan penurunan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Selain itu, pada posisi silinder pengganggu 0,25, dapat lebih mengarahkan aliran udara ke sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* yang diterima akan meningkat.

Apabila membandingkan putaran turbin angin Savonius tanpa pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D = 0,25$ di depan *returning blade*, terlihat bahwa untuk posisi silinder pengganggu $y/D = 0,25$ pada semua Reynolds *Number* tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius



Gambar 4.7 Grafik Putaran Turbin (n) terhadap Reynolds Number pada $y/D = 0,5$

Pada gambar 4.7 terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius dengan pengganggu $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 335,8 rpm, Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 584,45 rpm, dan Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ didapatkan nilai putaran sebesar 654,43rpm. Hal ini menunjukkan bahwa putaran turbin pada $y/D = 0,5$ meningkat seiring dengan peningkatan Reynolds Number.

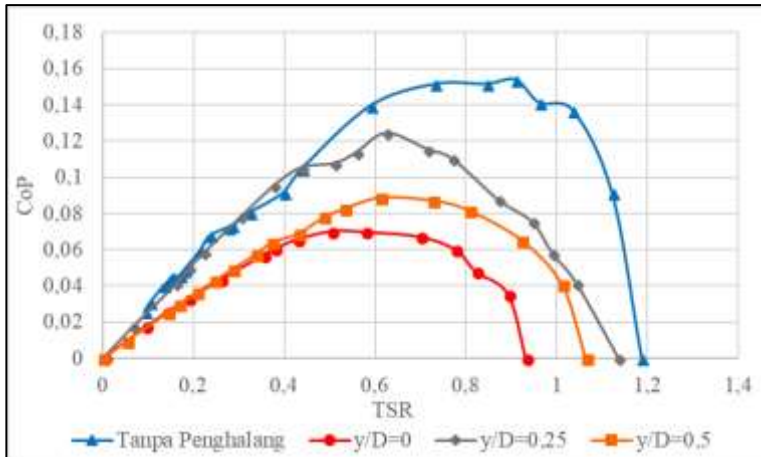
Putaran tertinggi turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu dengan $d/D = 1$ diharapkan terjadi pada setiap posisi penempatan silinder pengganggu. Penambahan silinder pengganggu pada posisi tertentu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* turbin angin Savonius sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat dan putaran turbin akan lebih cepat. Setelah dilakukan pengukuran, putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 1$ dan $y/D = 0,5$ mempunyai posisi optimal pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$. Meningkatnya nilai putaran turbin angin Savonius hingga

Reynolds *Number* terbesar terjadi karena penempatan silinder penghalang di depan *returning blade* dapat menghalangi aliran angin menuju *returning blade* sehingga menyebabkan penurunan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Selain itu, pada posisi silinder pengganggu 0,5 dapat lebih mengarahkan aliran udara ke sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* yang diterima akan meningkat.

Apabila membandingkan putaran turbin angin Savonius tanpa pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ di depan *returning blade*, terlihat bahwa hanya silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$ relatif efektif untuk meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius

4.7. Analisis Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkular terhadap Variasi Tip Speed Ratio

Pengukuran *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dilakukan dengan penambahan silinder sirkular didepan *returning blade*. Silinder pengganggu memiliki rasio $d/D = 1$ dengan variasi *Tip Speed Ratio* = $0 \leq \text{TSR} \leq 1,5$ dan variasi rasio posisi silinder $y/D = 0; 0,25; 0,5$. Analisa *Coefficient of Power* dilakukan dengan membandingkan daya yang dihasilkan turbin dengan daya awal yang dibutuhkan oleh turbin. Daya yang dihasilkan turbin dianalisa dengan menghitung torsi dinamis yang diukur menggunakan *brake dynamometer* dan dikalikan dengan kecepatan putar turbin. Kemudian data *Coefficient of Power* di plot grafik putaran terhadap variasi *Tip Speed Ratio* pada Reynolds *Number* yang sama seperti yang terlihat pada gambar 4.8, 4.9, 4.10.



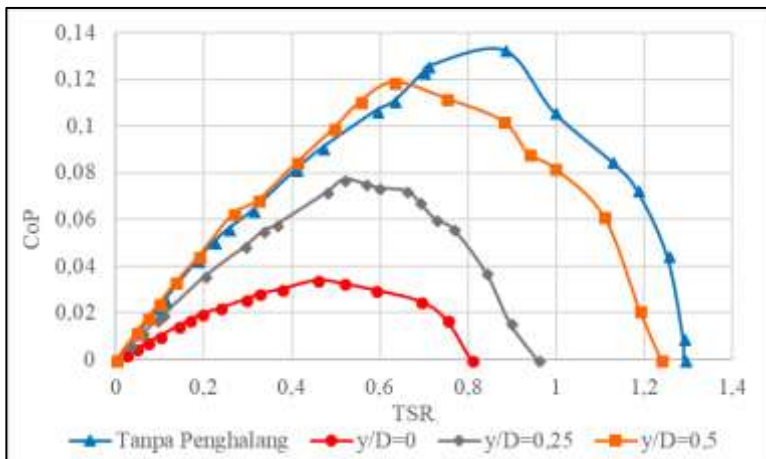
Gambar 4.8 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada *Reynolds Number* = $9,7 \times 10^4$

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,07 pada $TSR = 0.5$. Nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,124 pada $TSR = 0,63$. Kemudian nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0,5$ sebesar 0,089 pada $TSR = 0,61$. Nilai CoP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,25$. Lalu menurun pada $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CoP pada *Reynolds Number* = $9,7 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya

Pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa CoP dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi 0 meningkat hingga posisi 0,25 lalu turun hingga posisi 0,5. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu 0,25 dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada

sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga CoP akan meningkat hingga jarak optimum kemudian kembali menurun setelah melewati jarak optimum. Selain itu penempatan silinder pengganggu dengan diameter sama besar dengan diameter sudu *returning* turbin angin Savonius $d/D = 1$ diduga mempengaruhi tekanan total antara daerah didepan dan belakang sudu *returning*. Tekanan didepan silinder pengganggu menjadi lebih kecil dibandingkan pada daerah dibelakang sudu *returning*. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* bernilai negatif pada bagian sudu *returning* sehingga selisih gaya drag pada sudu *returning* dan *advancing* meningkat. Dengan semakin besar selisih drag maka *coefficient of power* (CoP) yang dihasilkan akan semakin besar

Apabila membandingkan CoP turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa untuk semua posisi y/D silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius

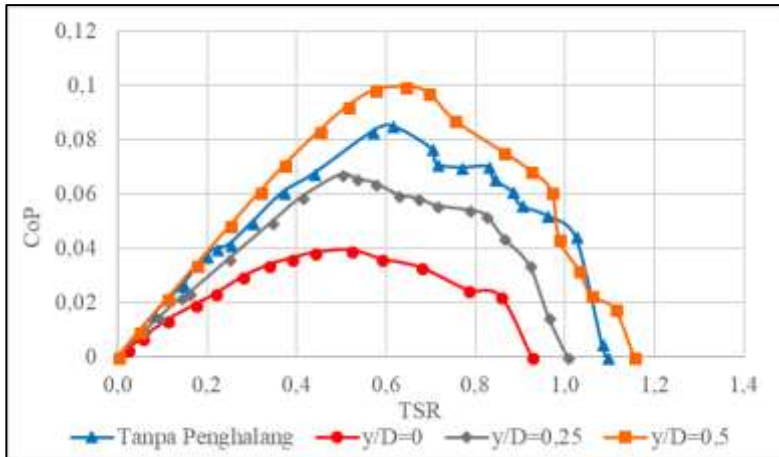


Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$

Pada gambar 4.9 terlihat bahwa nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,034 pada $TSR = 0.47$. Nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,077 pada $TSR = 0,52$. Kemudian nilai CoP pada rasio posisi $y/D = 0,5$ dengan nilai CoP sebesar 0,119 pada $TSR = 0,63$. Nilai CoP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CoP pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya

Pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa CoP dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi 0 meningkat hingga posisi 0,5. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu 0,5 dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga CoP akan meningkat hingga jarak optimum kemudian menurun setelah melewati jarak optimum. Selain itu penempatan silinder pengganggu dengan diameter sama besar dengan diameter sudu *returning* turbin angin Savonius $d/D = 1$ diduga mempengaruhi tekanan total antara daerah didepan dan belakang sudu *returning*. Tekanan didepan silinder pengganggu menjadi lebih kecil dibandingkan pada daerah dibelakang sudu *returning*. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* bernilai negatif pada bagian sudu *returning* sehingga selisih gaya *drag* pada sudu *returning* dan *advancing* meningkat. Dengan semakin besar selisih maka *coefficient of power* (CoP) yang dihasilkan akan semakin besar

Apabila membandingkan CoP turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa untuk semua posisi y/D silinder pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius.



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$

Pada gambar 4.10 terlihat bahwa nilai CoP dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,039 pada TSR = 0,52. Nilai CoP pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,067 pada TSR 0,49. Kemudian nilai CoP pada rasio posisi $y/D = 0,5$ sebesar 0,1 pada TSR 0,64. Nilai CoP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CoP pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya.

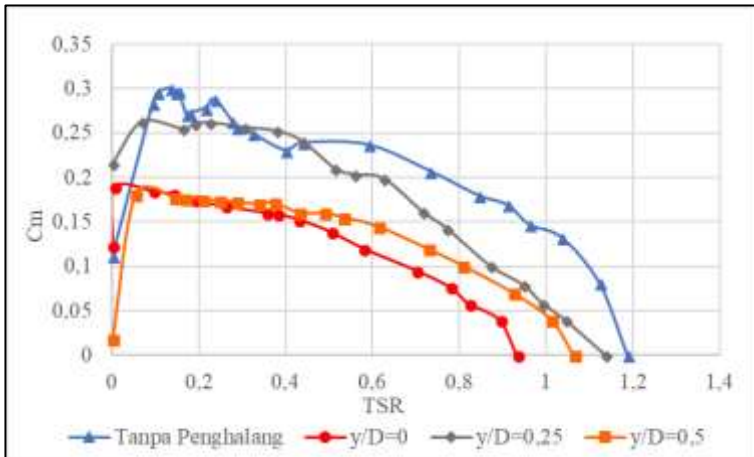
Pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa CoP dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi 0 meningkat hingga posisi 0,5. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu 0,5 dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga

CoP akan meningkat hingga jarak optimum kemudian menurun setelah melewati jarak optimum. Selain itu penempatan silinder pengganggu dengan diameter sama besar dengan diameter sudu *returning* turbin angin Savonius $d/D = 1$ diduga mempengaruhi tekanan total antara daerah didepan dan belakang sudu *returning*. Tekanan didepan silinder pengganggu menjadi lebih kecil dibandingkan pada daerah dibelakang sudu *returning*. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* bernilai negatif pada bagian sudu *returning* sehingga selisih gaya drag pada sudu *returning* dan *advancing* meningkat. Dengan semakin besar selisih drag maka *coefficient of power* (CoP) yang dihasilkan akan semakin besar

Apabila membandingkan CoP turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa hanya silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ relatif efektif untuk meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius

4.8. Analisis *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkular terhadap Variasi *Tip Speed Ratio*

Pengukuran *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dilakukan dengan penambahan silinder sirkular didepan *returning blade*. Silinder pengganggu memiliki rasio $d/D = 1$ dengan variasi *Tip Speed Ratio* $= 0 \leq \text{TSR} \leq 1,5$ dan variasi rasio posisi silinder $y/D = 0; 0,25; 0,5$. Analisa *Coefficient of Moment* dilakukan dengan membandingkan torsi yang dihasilkan turbin dengan torsi awal yang dibutuhkan oleh turbin. Torsi yang dihasilkan turbin dianalisa dengan menghitung torsi dinamis yang diukur menggunakan *brake dynamometer*. Kemudian data *Coefficient of Moment* di plot grafik putaran terhadap variasi *Tip Speed Ratio* pada Reynolds Number yang sama seperti yang terlihat pada gambar 4.11, 4.12, dan 4.13



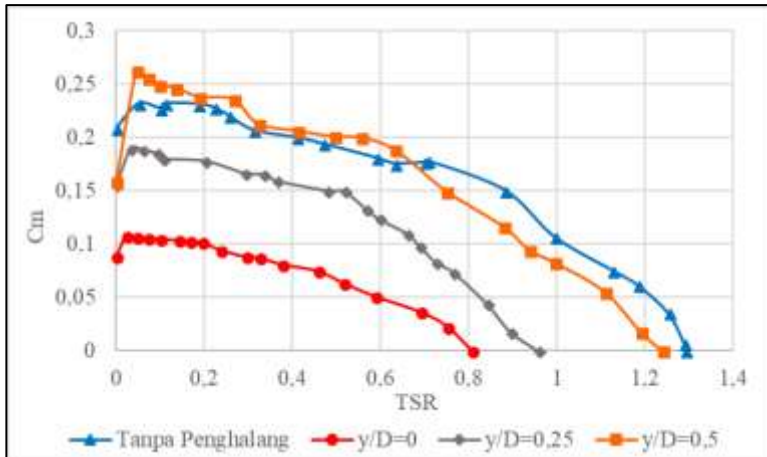
Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number $= 9,7 \times 10^4$

Pada gambar 4.11 terlihat bahwa nilai C_m dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,19 pada TSR 0,004. Nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,263 pada

TSR 0,07. Kemudian nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,5$ sebesar 0,181 pada TSR 0,05. Nilai CoP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,25$. Lalu menurun pada $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai C_m pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya

Pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa C_m dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi $y/D = 0$ meningkat hingga posisi $y/D = 0,25$ lalu turun hingga posisi $y/D = 0,5$. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu $y/D = 0,25$ dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga torsi dinamis akan meningkat hingga jarak optimum kemudian kembali menurun setelah melewati jarak optimum. Semakin meningkatnya torsi dinamis maka nilai C_m akan semakin meningkat.

Apabila membandingkan nilai C_m turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa untuk semua posisi y/D silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius.



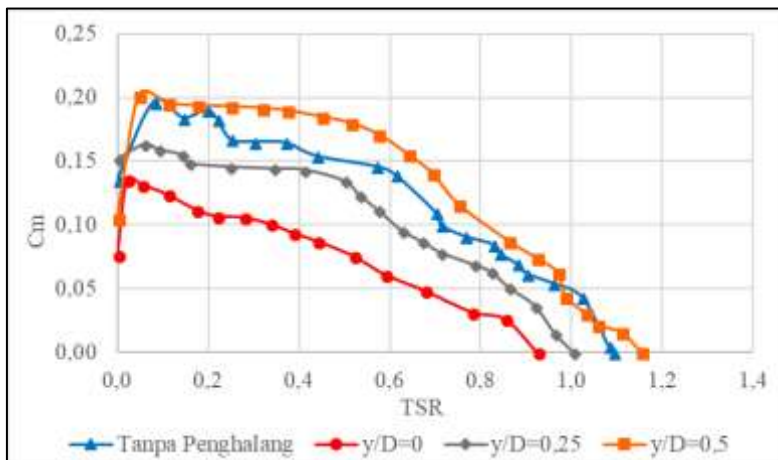
Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$

Pada gambar 4.12 terlihat bahwa nilai C_m dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,108 pada TSR 0,02. Nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,19 pada TSR 0,03. Kemudian nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,5$ sebesar 0,263 pada TSR 0,05. Nilai C_oP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai C_m pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya

Pada gambar 4.12 menunjukkan bahwa C_m dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi $y/D = 0$ meningkat hingga posisi $y/D = 0,5$. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu 0,5 dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga

torsi dinamis akan meningkat hingga jarak optimum kemudian kembali menurun setelah melewati jarak optimum. Semakin meningkatnya torsi dinamis maka nilai C_m akan semakin meningkat.

Apabila membandingkan nilai C_m turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa hanya silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ relatif efektif untuk meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap Variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$

Pada gambar 4.13 terlihat bahwa nilai C_m dengan pengganggu pada rasio posisi $y/D = 0$ sebesar 0,136 pada TSR 0,02. Nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,25$ sebesar 0,163 pada TSR 0,06. Kemudian nilai C_m pada rasio posisi $y/D = 0,5$ sebesar 0,201 pada TSR 0,05. Nilai C_oP pada $y/D = 0$ meningkat hingga $y/D = 0,5$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai C_m meningkat pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ meningkat hingga jarak y/D

optimumnya kemudian turun setelah melewati jarak y/D optimumnya

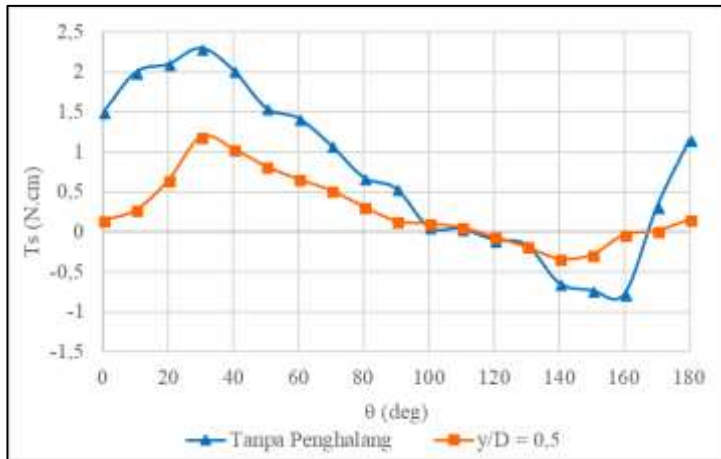
Pada gambar 4.13 menunjukkan bahwa C_m dengan penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$ pada posisi $y/D = 0$ meningkat hingga posisi $y/D = 0,5$. Hal ini disebabkan karena posisi silinder pengganggu 0,5 dapat menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin sehingga saat turbin bergerak gaya *drag* dari *returning blade* semakin mengecil. Pada posisi ini juga, silinder pengganggu dapat lebih mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya *drag* akan meningkat. Setelah melalui titik optimum, gaya *drag* pada sudu *returning* akan meningkat menyebabkan selisih gaya *drag* menurun. Sehingga torsi dinamis akan meningkat hingga jarak optimum kemudian kembali menurun setelah melewati jarak optimum. Semakin meningkatnya torsi dinamis maka nilai C_m akan semakin meningkat.

Apabila membandingkan nilai C_m turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, terlihat bahwa hanya silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ relatif efektif untuk meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius

4.9. Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkular terhadap Variasi Sudut

Pengukuran torsi statis terhadap variasi sudut dilakukan dengan penambahan silinder sirkular didepan *returning blade*. diukur dari nilai torsi statis pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Silinder pengganggu memiliki rasio $d/D = 1$ dengan variasi sudut bukaan turbin = $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ dan variasi rasio posisi silinder $y/D = 0,5$. Pengukuran torsi statis dilakukan saat turbin angin Savonius berada pada posisi 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° yang diukur menggunakan *torquemeter*. Analisa putaran turbin angin Savonius dilakukan dengan plot grafik torsi statis terhadap variasi sudut bukaan turbin pada

Reynolds Number yang sama seperti yang terlihat pada gambar 4.14, 4.15, 4.16



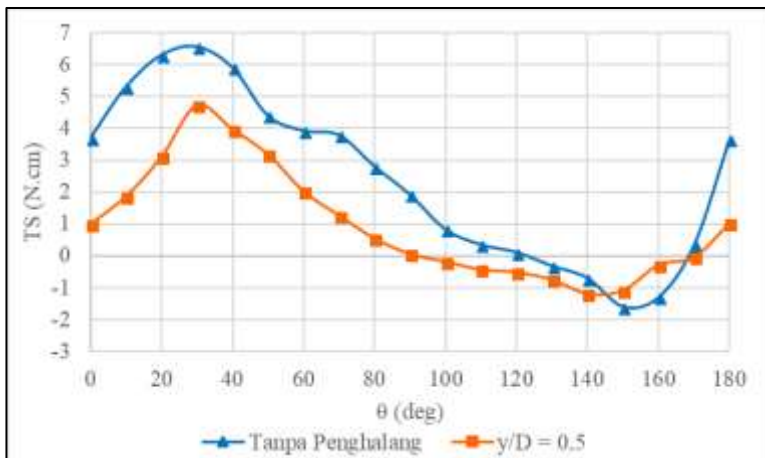
Gambar 4.14 Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$

Pada gambar 4.14 dapat diketahui bahwa nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ terjadi pada sudut 30° sebesar 1,2 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 140° sebesar -0,33 N.cm. Hal ini menunjukkan bahwa rasio posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$ memiliki *self-starting* paling baik pada bukaan sudut sebesar 30° dan tidak efektif pada sudut 140° .

Pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa torsi statis dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ yang terjadi pada sudut 30° bernilai positif. Peningkatan nilai torsi statis diakibatkan oleh meningkatnya Reynolds Number yang berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran udara. Peningkatan kecepatan aliran udara yang melewati turbin angin Savonius menyebabkan selisih gaya drag pada blade turbin angin meningkat. Semakin besar nilai selisih gaya drag diantara kedua blade akan menyebabkan nilai torsi statis turbin angin meningkat. Luas penampang advancing

blade yang dialiri udara juga berpengaruh terhadap selisih gaya *drag*. Selain itu arah gaya *drag* yang searah putaran turbin ikut mengakibatkan nilai torsi statis maksimum. Nilai torsi statis maksimum maka *self starting* pada turbin angin sangat baik. Pada nilai torsi statis pada sudut 140° bernilai negatif. Hal ini dapat terjadi karena arah gaya *drag* berlawanan dengan arah putaran turbin angin Savonius dan luas penampang *returning blade* yang dialiri udara lebih besar dibandingkan dengan luas penampang *advancing blade*. torsi statis yang bernilai negatif mengakibatkan turbin angin Savonius pada sudut ini tidak memiliki kemampuan *self starting*.

Apabila membandingkan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number $= 9,7 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan nilai torsi statis.



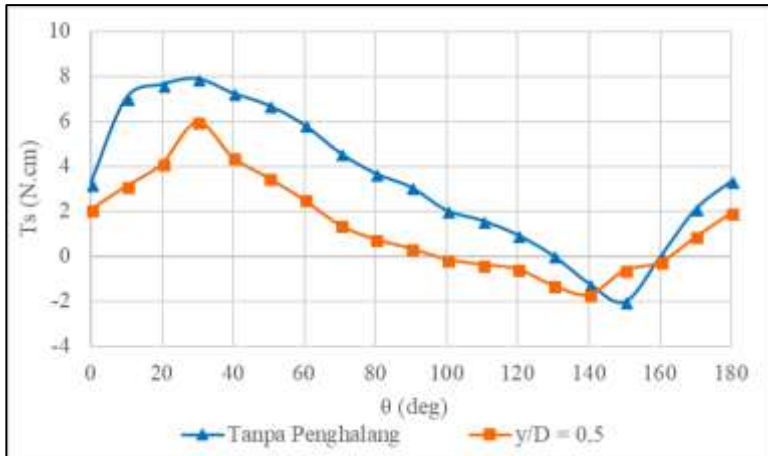
Gambar 4.15 Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds Number $= 14,5 \times 10^4$

Pada gambar 4.15 dapat diketahui bahwa nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number $= 14,5 \times 10^4$ terjadi pada sudut 30° sebesar 4,71

N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 140° sebesar $-1,2$ N.cm. Hal ini menunjukkan bahwa rasio posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ memiliki *self-starting* paling baik pada bukaan sudut sebesar 30° dan tidak efektif pada sudut 140°

Pada gambar 4.15 menunjukkan bahwa torsi statis dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ yang terjadi pada sudut 30° bernilai positif. Peningkatan nilai torsi statis diakibatkan oleh meningkatnya Reynolds Number yang berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran udara. Peningkatan kecepatan aliran udara yang melewati turbin angin Savonius menyebabkan selisih gaya *drag* pada *blade* turbin angin meningkat. Semakin besar nilai selisih gaya *drag* diantara kedua *blade* akan menyebabkan nilai torsi statis turbin angin meningkat. Luas penampang *advancing blade* yang dialiri udara juga berpengaruh terhadap selisih gaya *drag*. Selain itu arah gaya *drag* yang searah putaran turbin ikut mengakibatkan nilai torsi statis maksimum. Nilai torsi statis maksimum maka *self starting* pada turbin angin sangat baik. Pada nilai torsi statis pada sudut 140° bernilai negatif. Hal ini dapat terjadi karena arah gaya *drag* berlawanan dengan arah putaran turbin angin Savonius dan luas penampang *returning blade* yang dialiri udara lebih besar dibandingkan dengan luas penampang *advancing blade*. torsi statis yang bernilai negatif mengakibatkan turbin angin Savonius pada sudut ini tidak memiliki kemampuan *self starting*.

Apabila membandingkan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan nilai torsi statis.



Gambar 4.16 Grafik Torsi Statis (T_s) terhadap Variasi Sudut (θ) pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$

Pada gambar 4.16 dapat diketahui bahwa nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ terjadi pada sudut 30° sebesar $5,97$ N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 140° sebesar $-1,7$ N.cm. Hal ini menunjukkan bahwa rasio posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$ memiliki *self-starting* paling baik pada bukaan sudut sebesar 30° dan tidak efektif pada sudut 140°

Pada gambar 4.16 menunjukkan bahwa torsi statis dengan silinder pengganggu rasio posisi $y/D = 0,5$ yang terjadi pada sudut 30° bernilai positif. Peningkatan nilai torsi statis diakibatkan oleh meningkatnya Reynolds Number yang berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran udara. Peningkatan kecepatan aliran udara yang melewati turbin angin Savonius menyebabkan selisih gaya *drag* pada *blade* turbin angin meningkat. Semakin besar nilai selisih gaya *drag* diantara kedua *blade* akan menyebabkan nilai torsi statis turbin angin meningkat. Luas penampang *advancing blade* yang dialiri udara juga berpengaruh terhadap selisih gaya *drag*. Selain itu arah gaya *drag* yang searah putaran turbin ikut mengakibatkan nilai torsi statis maksimum. Nilai torsi statis

maksimum maka *self starting* pada turbin angin sangat baik. Pada nilai torsi statis pada sudut 140° bernilai negatif. Hal ini dapat terjadi karena arah gaya *drag* berlawanan dengan arah putaran turbin angin Savonius dan luas penampang *returning blade* yang dialiri udara lebih besar dibandingkan dengan luas penampang *advancing blade*. torsi statis yang bernilai negatif mengakibatkan turbin angin Savonius pada sudut ini tidak memiliki kemampuan *self starting*.

Apabila membandingkan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu di depan *returning blade*, torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ pada Reynolds Number $17,8 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan nilai torsi statis.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Pada studi eksperimen pengaruh posisi pengganggu arah tegak lurus arah angin datang (y/D) berupa silinder pengganggu $d/D = 1$, rasio posisi $S/D = 2,0$ didepan *returning blade* turbin angin Savonius dan variasi jarak tegak lurus arah datangnya angin $y/D = 0; 0,25; 0,5$ terhadap performa turbin angin Savonius dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Adanya silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 1$ dan $S/D = 2,0$ pada posisi $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang ditandai dengan kenaikan nilai putaran (n), *Coefficient of Power* (CoP), *Coefficint of Moment* (Cm), dan torsi statis (Ts) angin Savonius yang dibandingkan dengan turbin angin Savonius tidak diberi silinder pengganggu.
2. Variasi posisi transversal pengganggu (y/D) yang diteliti terhadap performa turbin angin Savonius. Dimana posisi y/D sebesar 0 dan 0,25 kurang efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius
3. Putaran terbesar yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular $d/D = 1$, $S/D = 2,0$ pada posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datangnya angin (y/D) = 0,5 didapatkan pada *Reynolds Number* = $17,8 \times 10^4$ sebesar 1,03 kali
4. *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular $d/D = 1$, $S/D = 2,0$ pada posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datangnya angin (y/D) = 0,5 didapatkan pada *Reynolds Number* = $17,8 \times 10^4$ sebesar 1,17 kali

5. *Coefficient of Moment* terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular $d/D = 1$, $S/D = 2,0$ pada posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datangnya angin (y/D) = 0,5 didapatkan pada Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$ sebesar 1,13 kali
6. Torsi statis minimum terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular $d/D = 1$, $S/D = 2,0$ pada posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datangnya angin (y/D) = 0,5 didapatkan pada Reynolds Number $17,8 \times 10^4$ sebesar 0,84 kali

5.2. Saran

Adapun saran perihal eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* untuk mengamati pola aliran ketika melewati silinder pengganggu dan turbin angin Savonius
2. Perlu dibuat kerangka penyangga turbin angin yang lebih kokoh untuk mengurangi getaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M., 2009. **The Use of a Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors**. Renewable Energy 35, 4:821-829.
- Badan Pusat Statistik Indonesia. 2017. **Kecepatan Angin dan Kelembaban 2011 sampai 2015**. <URL: <https://www.bps.go.id/statictable/2017/02/08/1960/kecepatan-angin-dan-kelembaban-di-stasiun-pengamatan-bmkg-2011-2015.html>>
- Fitriana, Ira., Anindhita., Sugiyono, Agus., Wahid, Laode M.A., Adiarso. 2017. **Outlook Energi Indonesia 2017**. Jakarta: Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia BPPT.
- Fox, Robert W., McDonald, Alain T., dan Pritchard, Philip J., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, Fifth Edition**, John Willey & Sons, Inc.
- Houigab, Jeong., Seoungho, Lee., Soon-Duck, Kwon. 2014. **Wind Tunnel Interference Effects on Power Performance of Small Darrieus Wind Turbines**. Korea: KOCED Wind Tunnel Center.
- Khaligh, Alireza., Onar, Omer C., 2010. **Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energi Conversion Systems**. USA: CRC Press
- Sprea, David A. 2009. **Wind Turbine Technology: Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering**. New York: ASME
- Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. 2002. **Wind Energy Explained:Theory, Design, and Application**. USA: John Willey&Sons
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., May 2010. **Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade**. Renewable Energy 35, 11:2618-2626.

- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., July 2010. **Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade.** Energy Conversion and Management 52, 1:236-242.
- Nawazir, Ielman 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular ebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius.** Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
- Ross, Ian J. May 2010. **Wind Tunnel Blockage Corrections: an Application to Vertical-Axis Wind Turbines.** Ohio: The School of Engineering of the University of Dayton.
- Y, Triyogi., D, Suprayogi., E, Spirda. 2009. **Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of an I-Type Bluff Body as a Passive Control.** JMES1543, 2291-2296. DOI:10.1243/09544062JMES1543
- Y, Triyogi., L, Abdul., P, Nabila P., dkk. 2017. **The Effect of Width of Single Curtain on the Performance of Savonius Wind Turbine.** AIP Conference Proceeding, Vol 1983, Issue 1, 2018, pp. 020023-1 – 020023-5
- Y, Triyogi., L, Abdul., P, Nabila P., dkk. 2017. **Numerical Study on the Effect of Width of Single Curtain on the Performance of Savonius Wind Turbine.** Matec Web of Conference, Vol 154, 01110 (2018), pp. 1-3

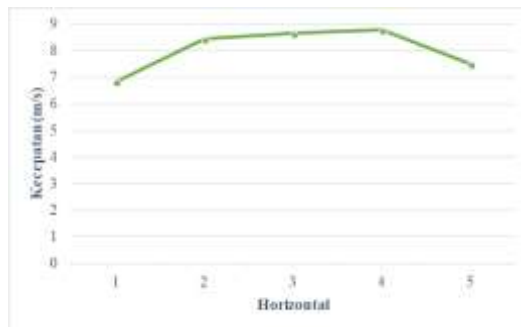
LAMPIRAN A

Keseragaman aliran (*uniform flow*) dibutuhkan dalam sebuah penelitian mengenai aliran dapat penelitian yang dilakukan agar didapatkan hasil yang paling ideal. Pada penelitian turbin angin Savonius ini, cara menentukan keseragaman alirannya adalah dengan mengatur jarak turbin angin Savonius dan blower. Untuk mengetahui besarnya kecepatan dari aliran angin adalah dengan menggunakan anemometer. Kemudian untuk menentukan keseragaman aliran, maka diambil 5 titik secara vertikal dan horizontal dengan mengatur ketinggian dari anemometer. Hasilnya, didapatkan bahwa keseragaman aliran didapat pada jarak turbin angin Savonius dengan blower sebesar 2250mm. Berikut merupakan data keseragaman aliran pada jarak turbin angin Savonius dengan blower sebesar 2250mm.

Tabel A.1 Data Kecepatan Angin Horizontal pada Jarak 2250m

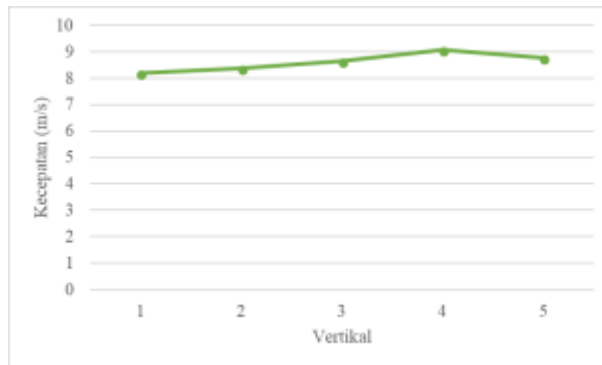
Titik Horizontal				
1	2	3	4	5
6,82	8,43	8,64	8,78	7,49

Gambar A.1 Grafik Keseragaman Alir Horizontal pada Jarak 2250m



Tabel A.2 Data Kecepatan Angin Vertikal pada Jarak 2250m

Titik Vertikal				
1	2	3	4	5
8,18	8,36	8,64	9,07	8,76

Gambar A.2 Grafik Keseragaman Alir Vertikal pada Jarak 2250m

LAMPIRAN B

Table B.1 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada
Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$

T	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	Λ (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	5,01	374,57	39,20	0	0	0,010	0,089	1,177	1,187	0	0	0
28,2	5,01	353,90	37,04	15	190	0,010	0,089	1,177	1,122	0,016	0,091	0,081
28,2	5,01	326,70	34,19	16	300	0,010	0,089	1,177	1,035	0,026	0,137	0,132
28,2	5,01	303,35	31,75	18	333,3	0,010	0,089	1,177	0,961	0,029	0,141	0,147
28,2	5,01	287,01	30,04	20	383,3	0,010	0,089	1,177	0,910	0,034	0,154	0,169
28,2	5,01	266,39	27,88	25	410,7	0,010	0,089	1,177	0,844	0,036	0,152	0,180
28,2	5,01	230,75	24,15	35	480	0,010	0,089	1,177	0,731	0,041	0,151	0,207
28,2	5,01	185,89	19,46	45	553,3	0,010	0,089	1,177	0,589	0,047	0,139	0,237
28,2	5,01	138,47	14,49	50	563,3	0,010	0,089	1,177	0,439	0,048	0,105	0,239
28,2	5,01	125,53	13,14	55	550	0,010	0,089	1,177	0,398	0,046	0,092	0,230
28,2	5,01	101,94	10,67	65	600	0,010	0,089	1,177	0,323	0,050	0,080	0,249
28,2	5,01	89,92	9,41	75	626,7	0,010	0,089	1,177	0,285	0,051	0,073	0,257
28,2	5,01	86,85	9,09	85	650	0,010	0,089	1,177	0,275	0,053	0,072	0,263
28,2	5,01	74,29	7,78	95	713,3	0,010	0,089	1,177	0,235	0,058	0,068	0,288
28,2	5,01	67,46	7,06	105	702,7	0,010	0,089	1,177	0,214	0,056	0,059	0,278
28,2	5,01	56,18	5,88	115	700	0,010	0,089	1,177	0,178	0,055	0,048	0,272
28,2	5,01	53,46	5,60	125	706,7	0,010	0,089	1,177	0,169	0,054	0,046	0,271
28,2	5,01	47,95	5,02	135	773,3	0,010	0,089	1,177	0,152	0,059	0,045	0,297
28,2	5,01	45,86	4,80	145	780	0,010	0,089	1,177	0,145	0,059	0,043	0,296
28,2	5,01	42,27	4,42	155	800	0,010	0,089	1,177	0,134	0,060	0,040	0,300
28,2	5,01	32,67	3,42	165	800	0,010	0,089	1,177	0,104	0,059	0,031	0,296
28,2	5,01	29,13	3,05	175	783,3	0,010	0,089	1,177	0,092	0,057	0,026	0,283
28,2	5,01	0	0	185	426,7	0,010	0,089	1,177	0	0,023	0	0,113

Table B.2 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada
Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$

T	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	Λ (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	7,5	609,20	63,76	0	0	0,010	0,089	1,177	1,290	0	0	0
28,2	7,5	608,43	63,68	15	50	0,010	0,089	1,177	1,288	0,003	0,009	0,007
28,2	7,5	591,25	61,88	35	206,7	0,010	0,089	1,177	1,252	0,016	0,045	0,036
28,2	7,5	558,83	58,49	55	351,3	0,010	0,089	1,177	1,183	0,028	0,073	0,062
28,2	7,5	531,25	55,60	75	439,3	0,010	0,089	1,177	1,125	0,034	0,085	0,076
28,2	7,5	469,69	49,16	95	609,3	0,010	0,089	1,177	0,994	0,048	0,106	0,107
28,2	7,5	416,36	43,58	115	840	0,010	0,089	1,177	0,881	0,068	0,133	0,151
28,2	7,5	333,97	34,96	135	991,3	0,010	0,089	1,177	0,707	0,080	0,126	0,178
28,2	7,5	329,83	34,52	155	1006	0,010	0,089	1,177	0,698	0,079	0,123	0,177
28,2	7,5	298,18	31,21	175	1020	0,010	0,089	1,177	0,631	0,079	0,111	0,176
28,2	7,5	278,75	29,18	195	1066	0,010	0,089	1,177	0,590	0,081	0,107	0,181
28,2	7,5	221,57	23,19	215	1148,7	0,010	0,089	1,177	0,469	0,087	0,091	0,194
28,2	7,5	192,91	20,19	235	1197	0,010	0,089	1,177	0,408	0,090	0,082	0,200
28,2	7,5	146,65	15,35	255	1250,7	0,010	0,089	1,177	0,310	0,093	0,064	0,207
28,2	7,5	120,78	12,64	275	1334,7	0,010	0,089	1,177	0,256	0,099	0,056	0,220
28,2	7,5	104,76	10,96	295	1392	0,010	0,089	1,177	0,222	0,102	0,051	0,228
28,2	7,5	87,07	9,11	315	1428,7	0,010	0,089	1,177	0,184	0,104	0,043	0,231
28,2	7,5	52,07	5,45	335	1451	0,010	0,089	1,177	0,110	0,104	0,026	0,232
28,2	7,5	46,34	4,85	355	1450	0,010	0,089	1,177	0,098	0,102	0,022	0,227
28,2	7,5	23,66	2,48	375	1490	0,010	0,089	1,177	0,050	0,104	0,012	0,232
		0	0	385	1390	0,010	0,089	1,177	0	0,094	0	0,209

Table B.3 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang pada
Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$

T	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	9,2	632,86	66,24	0	0	0,010	0,089	1,177	1,092	0	0	0
28,2	9,2	626,90	65,62	15	50	0,010	0,089	1,177	1,082	0,003	0,005	0,005
28,2	9,2	592,91	62,06	35	350	0,010	0,089	1,177	1,023	0,029	0,045	0,043
28,2	9,2	555,20	58,11	55	450	0,010	0,089	1,177	0,958	0,037	0,052	0,055
28,2	9,2	522,18	54,65	75	525	0,010	0,089	1,177	0,901	0,042	0,056	0,062
28,2	9,2	509,67	53,35	95	600	0,010	0,089	1,177	0,880	0,047	0,061	0,070
28,2	9,2	487,25	51,00	115	680	0,010	0,089	1,177	0,841	0,053	0,066	0,078
28,2	9,2	479,37	50,17	135	750	0,010	0,089	1,177	0,827	0,057	0,070	0,085
28,2	9,2	443,43	46,41	155	816	0,010	0,089	1,177	0,765	0,062	0,070	0,091
28,2	9,2	412,91	43,22	175	900	0,010	0,089	1,177	0,713	0,068	0,071	0,100
28,2	9,2	405,77	42,47	195	991,7	0,010	0,089	1,177	0,700	0,074	0,077	0,110
28,2	9,2	354,57	37,11	215	1225	0,010	0,089	1,177	0,612	0,094	0,085	0,139
28,2	9,2	329,16	34,45	235	1293,3	0,010	0,089	1,177	0,568	0,099	0,083	0,146
28,2	9,2	253,45	26,53	255	1373,3	0,010	0,089	1,177	0,437	0,104	0,068	0,154
28,2	9,2	213,88	22,39	275	1468,3	0,010	0,089	1,177	0,369	0,111	0,061	0,165
28,2	9,2	173,35	18,14	295	1493,3	0,010	0,089	1,177	0,299	0,112	0,049	0,165
28,2	9,2	144,34	15,11	315	1526,7	0,010	0,089	1,177	0,249	0,113	0,042	0,167
28,2	9,2	126,74	13,27	335	1663,3	0,010	0,089	1,177	0,219	0,124	0,040	0,183
28,2	9,2	113,89	11,92	355	1733,3	0,010	0,089	1,177	0,197	0,128	0,037	0,190
28,2	9,2	83,59	8,75	375	1710	0,010	0,089	1,177	0,144	0,124	0,027	0,184
28,2	9,2	46,35	4,85	395	1820	0,010	0,089	1,177	0,080	0,133	0,016	0,197
28,2	9,2	0	0	415	1400	0,010	0,089	1,177	0	0,092	0	0,136

Table B.4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa
Penghalang

Sudut	Ts _o		
	Re = 9×10^4	Re = $13,8 \times 10^4$	Re = $16,8 \times 10^4$
0	1,5	3,7	3,22
10	2	5,3	7,02
20	2,1	6,3	7,63
30	2,3	6,56	7,88
40	2,02	5,9	7,24
50	1,55	4,39	6,7
60	1,42	3,92	5,83
70	1,08	3,78	4,59
80	0,68	2,8	3,67
90	0,54	1,91	3,06
100	0,06	0,82	2,03
110	0,04	0,34	1,58
120	-0,1	0,1	0,93
130	-0,16	-0,33	0,01
140	-0,64	-0,71	-1,22
150	-0,73	-1,61	-2,03
160	-0,78	-1,31	-0,02
170	0,31	0,33	2,1
180	1,15	3,65	3,34

LAMPIRAN C

Table C.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds *Number* = $9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
29,5	294,29	30,80	0	0	0,010	0,089	1,174	0,933	0	0	0
29,5	281,83	29,50	15	100	0,010	0,089	1,174	0,893	0,008	0,035	0,040
29,5	259,45	27,16	25	150	0,010	0,089	1,174	0,822	0,012	0,048	0,058
29,5	245,51	25,70	35	200	0,010	0,089	1,174	0,778	0,015	0,060	0,077
29,2	221,11	23,14	45	250	0,010	0,089	1,175	0,701	0,019	0,067	0,096
29,2	182,79	19,13	65	323,3	0,010	0,089	1,175	0,579	0,024	0,070	0,121
29,3	159,07	16,65	75	373,3	0,010	0,089	1,175	0,504	0,028	0,070	0,139
29,3	135,51	14,18	85	413,3	0,010	0,089	1,175	0,429	0,031	0,066	0,153
29,3	119,69	12,53	95	436,7	0,010	0,089	1,175	0,379	0,032	0,060	0,159
29,3	111,83	11,70	105	450	0,010	0,089	1,175	0,354	0,032	0,057	0,161
29,1	81,82	8,56	115	475	0,010	0,089	1,175	0,259	0,034	0,044	0,168
29,1	59,99	6,28	125	500	0,010	0,089	1,175	0,190	0,035	0,033	0,175
28,9	44,65	4,67	135	525	0,010	0,089	1,176	0,142	0,036	0,026	0,182
29,1	29,81	3,12	145	541,6667	0,010	0,089	1,175	0,094	0,037	0,017	0,185
29,1	1,40	0,15	155	561,6667	0,010	0,089	1,175	0,004	0,038	0,001	0,190
29,1	0	0	165	430	0,010	0,089	1,175	0	0,025	0	0,124

Table C.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds *Number* = $14,5 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
29,1	381,03	39,88	0	0	0,010	0,089	1,175	0,807	0	0	0
29,1	354,51	37,11	15	125	0,010	0,089	1,175	0,751	0,010	0,017	0,023
29,1	326,31	34,15	35	210	0,010	0,089	1,175	0,691	0,016	0,025	0,036
29,1	277,90	29,09	55	300	0,010	0,089	1,175	0,588	0,023	0,030	0,051
29,2	243,87	25,52	95	400	0,010	0,089	1,175	0,516	0,028	0,033	0,063
28,9	215,95	22,60	115	475	0,010	0,089	1,176	0,457	0,034	0,034	0,075
28,9	177,51	18,58	135	525	0,010	0,089	1,176	0,376	0,036	0,030	0,081
28,9	153,51	16,07	155	575	0,010	0,089	1,176	0,325	0,039	0,028	0,087
29,1	138,80	14,53	175	600	0,010	0,089	1,175	0,294	0,040	0,026	0,088
29,1	111,47	11,67	195	650	0,010	0,089	1,175	0,236	0,042	0,022	0,095
29,1	92,01	9,63	235	725	0,010	0,089	1,175	0,195	0,046	0,020	0,102
29,1	79,11	8,28	255	750	0,010	0,089	1,175	0,167	0,046	0,017	0,103
29,1	66,65	6,98	275	775	0,010	0,089	1,175	0,141	0,047	0,015	0,104
29,1	46,47	4,86	295	800	0,010	0,089	1,175	0,098	0,047	0,010	0,105
29,1	33,51	3,51	315	825	0,010	0,089	1,175	0,071	0,048	0,008	0,106
29,1	21,41	2,24	335	848,3	0,010	0,089	1,175	0,045	0,048	0,005	0,107
29,1	10,48	1,10	355	871,7	0,010	0,089	1,175	0,022	0,048	0,002	0,108
29,1	0	0	375	800	0,010	0,089	1,175	0	0,040	0	0,088

Table C.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0$ untuk Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	530,37	55,51	0	0	0,010	0,089	1,178	0,925	0	0	0
28,2	490,22	51,31	15	200	0,010	0,089	1,178	0,855	0,017	0,022	0,026
28,2	447,63	46,85	35	260	0,010	0,089	1,178	0,781	0,021	0,025	0,032
28	388,05	40,62	55	400	0,010	0,089	1,179	0,677	0,032	0,033	0,049
28	337,55	35,33	75	510	0,010	0,089	1,179	0,589	0,041	0,036	0,061
28	298,96	31,29	115	650	0,010	0,089	1,179	0,522	0,050	0,039	0,075
28,2	251,69	26,34	155	775	0,010	0,089	1,178	0,439	0,058	0,038	0,087
28	221,86	23,22	195	860	0,010	0,089	1,179	0,387	0,062	0,036	0,094
28	192,78	20,18	235	950	0,010	0,089	1,179	0,336	0,067	0,034	0,101
28,8	159,57	16,70	275	1025	0,010	0,089	1,176	0,278	0,070	0,029	0,106
27,8	124,95	13,08	315	1075	0,010	0,089	1,180	0,218	0,071	0,023	0,107
27,8	99,20	10,38	355	1150	0,010	0,089	1,180	0,173	0,074	0,019	0,112
27,8	62,97	6,59	395	1275	0,010	0,089	1,180	0,110	0,082	0,014	0,124
28	30,77	3,22	435	1368,3	0,010	0,089	1,179	0,054	0,087	0,007	0,131
28	12,13	1,27	475	1438,3	0,010	0,089	1,179	0,021	0,090	0,003	0,136
28	0	0	495	1036,7	0,010	0,089	1,179	0	0,050	0	0,076

LAMPIRAN D

Table D.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
30,3	358,55	37,53	0	0	0,010	0,089	1,171	1,136	0	0	0
30,3	329,15	34,45	15	100	0,010	0,089	1,171	1,043	0,008	0,041	0,040
30,3	312,48	32,71	25	150	0,010	0,089	1,171	0,990	0,012	0,058	0,058
30,3	298,50	31,24	30	200	0,010	0,089	1,171	0,946	0,016	0,075	0,080
30,2	274,71	28,75	35	250	0,010	0,089	1,171	0,871	0,020	0,088	0,101
30,3	243,11	25,45	45	350	0,010	0,089	1,171	0,770	0,028	0,110	0,143
30,3	225,51	23,60	55	400	0,010	0,089	1,171	0,715	0,032	0,115	0,161
30,3	197,23	20,64	50	475	0,010	0,089	1,171	0,625	0,040	0,124	0,199
30,3	176,13	18,44	65	500	0,010	0,089	1,171	0,558	0,041	0,114	0,204
30,2	161,44	16,90	75	525	0,010	0,089	1,171	0,512	0,042	0,108	0,211
30,2	137,96	14,44	85	600	0,010	0,089	1,171	0,437	0,048	0,105	0,241
30,2	119,12	12,47	95	635	0,010	0,089	1,171	0,378	0,050	0,095	0,253
30,2	96,10	10,06	105	653,3	0,010	0,089	1,171	0,305	0,051	0,078	0,257
30,2	70,13	7,34	115	675	0,010	0,089	1,171	0,222	0,052	0,058	0,262
30,2	59,85	6,26	135	691,7	0,010	0,089	1,171	0,190	0,052	0,049	0,260
30,1	50,94	5,33	155	700	0,010	0,089	1,172	0,161	0,051	0,041	0,255
30,1	21,14	2,21	165	726,7	0,010	0,089	1,172	0,067	0,052	0,018	0,263
30,1	0	0	175	636,7	0,010	0,089	1,172	0	0,043	0	0,216

Table D.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
26,9	451,99	47,31	0	0	0,010	0,089	1,183	0,957	0	0	0
26,9	422,58	44,23	15	100	0,010	0,089	1,183	0,895	0,008	0,016	0,018
26,9	396,89	41,54	35	250	0,010	0,089	1,183	0,840	0,020	0,037	0,044
27	361,40	37,83	45	400	0,010	0,089	1,183	0,765	0,033	0,056	0,073
27,7	342,65	35,86	55	455	0,010	0,089	1,180	0,725	0,037	0,060	0,083
27,7	325,03	34,02	75	550	0,010	0,089	1,180	0,688	0,044	0,068	0,098
28,1	311,27	32,58	95	625	0,010	0,089	1,179	0,659	0,049	0,072	0,110
28,1	281,63	29,48	115	711,7	0,010	0,089	1,179	0,596	0,056	0,074	0,124
28,1	267,48	28,00	135	776,7	0,010	0,089	1,179	0,566	0,060	0,075	0,133
28,1	244,30	25,57	155	876,7	0,010	0,089	1,179	0,517	0,067	0,077	0,150
28,2	225,73	23,63	175	900	0,010	0,089	1,178	0,478	0,068	0,072	0,150
28,2	172,21	18,02	195	963,3	0,010	0,089	1,178	0,365	0,072	0,058	0,159
28,3	158,09	16,55	215	1013,3	0,010	0,089	1,178	0,335	0,074	0,055	0,166
28,3	137,71	14,41	235	1038,3	0,010	0,089	1,178	0,292	0,075	0,049	0,167
28,3	95,49	9,99	255	1113,3	0,010	0,089	1,178	0,202	0,080	0,036	0,178
28,5	50,15	5,25	295	1163,3	0,010	0,089	1,177	0,106	0,081	0,019	0,180
28,7	43,45	4,55	335	1226,7	0,010	0,089	1,177	0,092	0,083	0,017	0,185
28,7	28,57	2,99	355	1263,3	0,010	0,089	1,177	0,060	0,085	0,011	0,189
28,9	15,36	1,61	415	1326,7	0,010	0,089	1,176	0,033	0,085	0,006	0,190
29,1	0	0	455	1203,3	0,010	0,089	1,175	0	0,070	0	0,156

Table D.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,25$ untuk Reynolds *Number* = $17,8 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
31,5	581,67	60,88	0	0	0,010	0,089	1,167	1,004	0	0	0
31,5	557,05	58,30	15	125	0,010	0,089	1,167	0,961	0,010	0,015	0,015
31,5	532,31	55,72	25	288,3	0,010	0,089	1,167	0,919	0,025	0,034	0,037
31,2	499,23	52,25	35	400	0,010	0,089	1,168	0,862	0,034	0,044	0,051
31,2	476,45	49,87	45	500	0,010	0,089	1,168	0,822	0,042	0,052	0,063
31,2	454,71	47,59	55	550	0,010	0,089	1,168	0,785	0,046	0,054	0,069
31,2	412,84	43,21	65	626,7	0,010	0,089	1,168	0,713	0,052	0,056	0,078
31,2	388,77	40,69	75	700	0,010	0,089	1,168	0,671	0,058	0,058	0,087
31,2	363,05	38,00	115	800	0,010	0,089	1,168	0,627	0,064	0,060	0,095
31,1	332,57	34,81	175	976,7	0,010	0,089	1,168	0,574	0,075	0,064	0,112
31,1	308,66	32,31	215	1100	0,010	0,089	1,168	0,533	0,082	0,066	0,123
30,8	289,25	30,28	255	1223,3	0,010	0,089	1,169	0,499	0,090	0,067	0,135
30,8	238,20	24,93	295	1326,7	0,010	0,089	1,169	0,411	0,096	0,059	0,143
30,8	199,03	20,83	335	1373,3	0,010	0,089	1,169	0,343	0,097	0,050	0,144
30,8	143,33	15,00	375	1423,3	0,010	0,089	1,169	0,247	0,098	0,036	0,146
30,8	91,51	9,58	455	1523,3	0,010	0,089	1,169	0,158	0,100	0,023	0,148
30,8	81,42	8,52	495	1611,7	0,010	0,089	1,169	0,141	0,104	0,022	0,155
30,8	52,59	5,50	555	1700	0,010	0,089	1,169	0,091	0,107	0,014	0,159
30,8	34,27	3,59	615	1790	0,010	0,089	1,169	0,059	0,110	0,010	0,163
30,8	0	0	735	1826,7	0,010	0,089	1,169	0	0,102	0	0,152

LAMPIRAN E

Table E.1 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds *Number* = $9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
33	335,80	35,15	0	0	0,010	0,089	1,162	1,064	0	0	0
33	319,40	33,43	15	100	0,010	0,089	1,162	1,012	0,008	0,041	0,040
32,3	291,28	30,49	25	175	0,010	0,089	1,164	0,923	0,014	0,065	0,071
32,1	254,75	26,66	35	250	0,010	0,089	1,165	0,807	0,020	0,082	0,101
32,1	229,37	24,01	45	300	0,010	0,089	1,165	0,727	0,024	0,087	0,120
32,1	193,25	20,23	55	363,3	0,010	0,089	1,165	0,612	0,029	0,089	0,145
32,1	167,89	17,57	65	395	0,010	0,089	1,165	0,532	0,031	0,083	0,155
32,1	153,88	16,11	75	415	0,010	0,089	1,165	0,488	0,032	0,078	0,160
32,3	136,00	14,23	85	425	0,010	0,089	1,164	0,431	0,032	0,069	0,160
32,3	117,56	12,30	95	460	0,010	0,089	1,164	0,373	0,034	0,064	0,172
32,3	106,06	11,10	105	466,7	0,010	0,089	1,164	0,336	0,034	0,057	0,170
32	90,25	9,45	115	481,6667	0,010	0,089	1,165	0,286	0,034	0,049	0,172
32	78,10	8,17	125	495,0	0,010	0,089	1,165	0,248	0,034	0,043	0,174
32,1	65,17	6,82	135	508,3	0,010	0,089	1,165	0,207	0,035	0,036	0,176
32,1	53,02	5,55	145	520	0,010	0,089	1,165	0,168	0,035	0,030	0,176
32,4	45,15	4,73	155	531,7	0,010	0,089	1,164	0,143	0,035	0,025	0,177
32,4	16,79	1,76	165	550	0,010	0,089	1,164	0,053	0,036	0,010	0,181
32,2	0	0	175	213,3	0,010	0,089	1,164	0	0,004	0	0,018

Table E.2 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds *Number* = $14,5 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
31,2	584,447	61,172	0	0	0,010	0,089	1,168	1,237	0	0	0
31,2	561,553	58,776	15	100	0,010	0,089	1,168	1,189	0,008	0,021	0,018
31,2	522,987	54,739	35	300	0,010	0,089	1,168	1,107	0,025	0,061	0,055
31,3	469,620	49,154	55	450	0,010	0,089	1,168	0,994	0,037	0,082	0,083
31,3	442,167	46,280	75	525	0,010	0,089	1,168	0,936	0,042	0,088	0,094
31,3	415,033	43,440	95	650	0,010	0,089	1,168	0,879	0,052	0,102	0,116
31,1	353,487	36,998	135	850	0,010	0,089	1,168	0,748	0,067	0,112	0,150
31	298,327	31,225	175	1075	0,010	0,089	1,169	0,632	0,084	0,119	0,188
30,8	261,613	27,382	195	1150	0,010	0,089	1,169	0,554	0,089	0,111	0,200
30,8	233,627	24,453	215	1175	0,010	0,089	1,169	0,495	0,089	0,099	0,201
31	194,060	20,312	235	1220	0,010	0,089	1,169	0,411	0,092	0,085	0,206
30,9	151,753	15,884	255	1271,667	0,010	0,089	1,169	0,321	0,095	0,068	0,213
31,2	125,513	13,137	275	1400	0,010	0,089	1,168	0,266	0,105	0,063	0,236
31,2	88,300	9,242	295	1431,667	0,010	0,089	1,168	0,187	0,106	0,044	0,238
31,3	63,567	6,653	315	1491,667	0,010	0,089	1,168	0,135	0,110	0,033	0,246
31	45,507	4,763	335	1525	0,010	0,089	1,169	0,096	0,111	0,024	0,249
31,2	33,693	3,527	355	1575	0,010	0,089	1,168	0,071	0,114	0,018	0,255
31,3	21,587	2,259	375	1628,333	0,010	0,089	1,168	0,046	0,117	0,012	0,263
31,2	0	0	435	1195	0,010	0,089	1,168	0	0,071	0	0,159

Table E.3 Data Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$ untuk Reynolds Number = $17,8 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
27,7	654,43	68,50	0	0	0,010	0,089	1,180	1,154	0	0	0
27,7	629,88	65,93	15	125	0,010	0,089	1,180	1,110	0,010	0,018	0,016
27,9	599,97	62,80	25	175	0,010	0,089	1,179	1,058	0,014	0,023	0,022
28,2	584,50	61,18	35	250	0,010	0,089	1,178	1,030	0,020	0,032	0,031
28,2	559,45	58,56	45	350	0,010	0,089	1,178	0,986	0,028	0,043	0,044
28,8	549,99	57,57	65	500	0,010	0,089	1,176	0,970	0,041	0,061	0,063
28,8	523,53	54,80	85	600	0,010	0,089	1,176	0,923	0,048	0,069	0,074
28,9	488,75	51,16	105	711,7	0,010	0,089	1,176	0,862	0,057	0,075	0,087
29,1	426,29	44,62	145	950	0,010	0,089	1,175	0,751	0,075	0,087	0,116
29,2	393,31	41,17	185	1158,3	0,010	0,089	1,175	0,693	0,091	0,097	0,140
29,3	363,76	38,07	225	1300	0,010	0,089	1,175	0,641	0,100	0,100	0,155
29,5	325,81	34,10	265	1450	0,010	0,089	1,174	0,574	0,110	0,098	0,171
29,8	290,98	30,46	305	1550	0,010	0,089	1,173	0,513	0,116	0,092	0,180
29,5	255,38	26,73	345	1625	0,010	0,089	1,174	0,450	0,119	0,083	0,185
29,5	211,20	22,11	385	1700	0,010	0,089	1,174	0,372	0,123	0,071	0,190
30,1	180,17	18,86	425	1750	0,010	0,089	1,172	0,318	0,123	0,061	0,192
30,1	141,82	14,84	465	1800	0,010	0,089	1,172	0,250	0,124	0,048	0,193
30,3	99,45	10,41	505	1843,3	0,010	0,089	1,171	0,175	0,125	0,034	0,194
30,8	62,82	6,58	545	1893,3	0,010	0,089	1,169	0,111	0,126	0,022	0,196
30,8	26,68	2,79	645	2033,3	0,010	0,089	1,169	0,047	0,129	0,009	0,201
30,8	0	0	765	1493,3	0,010	0,089	1,169	0	0,068	0	0,106

Table E.1 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penghalang pada Posisi $y/D = 0,5$

Sudut	Ts		
	Re = 9×10^4	Re = $13,8 \times 10^4$	Re = $16,8 \times 10^4$
0	0,15	0,99	2,08
10	0,28	1,86	3,12
20	0,65	3,1	4,12
30	1,19	4,71	5,97
40	1,04	3,96	4,4
50	0,82	3,18	3,49
60	0,66	2,02	2,51
70	0,52	1,26	1,39
80	0,32	0,54	0,76
90	0,14	0,05	0,35
100	0,11	-0,19	-0,13
110	0,06	-0,44	-0,36
120	-0,06	-0,52	-0,57
130	-0,18	-0,76	-1,3
140	-0,33	-1,2	-1,7
150	-0,28	-1,09	-0,62
160	-0,03	-0,29	-0,26
170	0,02	-0,05	0,88
180	0,16	1,02	1,94

BIODATA PENULIS



Ayu Putri Pratiwi dilahirkan di Jakarta tanggal 26 Juli 1996, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikan formalnya pada tahun 2000 di TK Aisyah 32. Penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 011 Srengseng Sawah (2002-2008), SMP Negeri 131 Jakarta (2008-2011) dan SMA Negeri 38 Jakarta (2011-2014). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi. Setelah mendapatkan saran akhirnya penulis memilih Teknik Mesin ITS dan diterima.

Selama empat tahun perkuliahan, selain fokus pada hal akademis, penulis juga aktif dalam organisasi dan kepanitiaan. Dalam organisasi kemahasiswaan, di tahun ketiga penulis, aktif sebagai fungsio BSO Event Besar Himpunan Mahasiswa Mesin dan dipercaya sebagai Kepala Divisi Event Besar Himpunan Mahasiswa Mesin. Pada tahun keempat penulis mengikuti program pertukaran pelajar ke Universiti Teknikal Malaysia Melaka selama satu semester.

Sebagai bentuk aplikatif dari ilmu yang didapat semasa perkuliahan, penulis melaksanakan kerja praktik di PT Dirgantara Indonesia Indonesia selama satu bulan pada tahun ketiga.

Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email ayuputri2607@gmail.com